O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIY VA O‘RTA MAXSUS TA’LIM VAZIRLIGI

M.A. KOROLI, F.SH. UMARJONOVA, F.A. XOSHIMOVA

TERMODINAMIKA
ISSIQLIK TEXNIKASI

O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta’lim vazirligi tomonidan darslik sifatida kiritilgan

«BOOK TRADE KO»
Toshkent – 2022

UDK: 621.1.016.7
KBK:

Ushbu darslik “5312200 – Konchilik elektr mexanikasi” va “5320300 – Texnologik mashina va jihozlar (konchilik)” ta’lim yo‘nalishi bakalavriat talabalari uchun mo‘ljallangan. Darslikda texnik termodinamik jarayonlar, ularning asosiy parametrlari, holat o‘zgarishlari tenglamalari, suv bug‘ini hosil qilish va uni ishlatilish sikllari va termodinamikaning qonunlari, issiqlik uzatish turlari, ularning qonunlari, issiqlik energetik qurilmalarda bo‘ladigan jarayonlar hamda ularning ishlash uslublari bayon etilgan va shu mavzularga doir nazorat savollari va masalalar keltirilgan.

Taqrizchilar:
Avezov R.R. – O‘zR FA FTI «Selektiv qoplamalar va quyosh-issiqlik qurilmalari» laboratoriyasi mudiri, t.f.d., prof.
Alimov X.A. – ToshDTU «Issiqlik energetikasi» kafedrasi dotsenti, t.f.n.

ISBN

KIRISH

Termodinamika – tizimlar, (jismlar yoki jismlarning elementlari) oʻrtasidagi energetik oʻzaro ta’sirlashishlar va bu oʻzaro ta’sirlashishlarning kechishining oʻziga xos xususiyatlarini oʻrganuvchi fandir.

Termolinamikaning uslubi tabiatni bilishning umuminsoniy tajribasini umumlashtirish asosida olingan va bilimlarning barcha sohalarida bu qoidalarni toʻgʻridan-toʻgʻri tekshirib koʻrish imkonini beruvchi ba’zi bir postulatlarni qat’iy matematik rivojlantirishdan iborat. Bunday tamoyil boʻyicha qurilgan termodinamika fenomenologik termodinamika deb ataladi. U mikroskopik hodisalarni tasvirlamasdan tizimning makroskopik kattaliklari oʻrtasidagi bogʻlanishlarni, masalan, bosim, harorat va bosim oʻrtasidagi bogʻlanishlarni oʻrganadi.

Termodinamikaning birinchi asosi oʻzida energiyaning saqlanishi va aylanishi qonunining miqdoriy ifodalanishini taqdim qiladi: *«Tizimning izolyasiyalangan energiyasi tizimda sodir boʻladigan barcha oʻzgarishlarda doimiy kattalikni saqlab qoladi».* Bundan, xususan, tashqaridan energiya olmasdan ishlashga qodir boʻlgan birinchi turdagi abadiy dvigatelni yaratib boʻlmasligi toʻgʻrisidagi xulosa kelib chiqadi.

Ikkinchi asos tizimda sodir boʻlayotgan jarayonlarning sifat jihati va yoʻnalishini taqdim qiladi, mutlaq harorat va entropiyaning termodinamik tizim holatining funksiyalari sifatida mavjud boʻlishi tamoyilini aks ettiradi: *«Harorat jismlar va jismning elementlari oʻrtasida oʻz-oʻzidan kechadigan issiqlik almashinishining yoʻnalishini belgilaydigan holatning birdan-bir funksiyasi boʻlib hisoblanadi».*

Ikkinchi asosning muhim oqibati quyidagi tasdiqlash boʻlib hisoblanadi: *«Issiqlikni toʻliq ishga aylantirishni amalga oshirishning iloji yoʻq (bitta tizim doirasida)».* Bundan issiqlikni toʻliq ishga aylantirishga qodir boʻlgan ikkinchi turdagi abadiy dvigatelni yaratib boʻlmasligi toʻgʻrisidagi xulosa kelib chiqadi.

Termodinamikaning uchinchi asosi (Nerst qonuni) shunday ta’rifga ega: *haroratlarning mutlaq nolida barcha muvozanat jarayonlari entropiyaning oʻzgarishisiz sodir boʻladi.*

Texnik termodinamika termodinamikaning – ularda energiyaning barcha mumkin boʻlgan aylanishlari amalga oshadigan jarayonlar, hodisalar va qurilmalarni oʻrganuvchi boʻlimidir.

1. TERMODINAMIKANING ASOSIY TUSHUNCHALARI VA ULARNING TA'RIFLARI

1.1. Termodinamik tizim

Tizim deganda bir-biri va tashqi muhit bilan mexanik va issiqlik o'zaro ta'sirlashishida bo'lgan jism yoki jismlar jamlanmasi tushuniladi. Agar tizimda sodir bo'layotgan barcha o'zgarishlarda u moddaning doimiy miqdorini saqlab qolsa, u holda tizim *yopiq tizim* deb ataladi. Agar tizimda sodir bo'layotgan barcha o'zgarishlarda u moddaning doimiy miqdorini saqlab qolmasa, u holda tizimni *ochiq tizim* deb atash qabul qilingan.

Agar tizim va uni atrof muhit o'rtasida qandaydir bir mexanik yoki energetik o'zaro ta'sirlashishlar bo'lmasa, u holda bunday tizimni *izolyasiyalangan (yakkalangan va adiabatik) tizim* deb atash qabul qilingan. YAkkalangan tizimga gaz bilan to'ldirilgan porshenli silindr bu tizimga misol bo'ladi. Gaz uchun silindr devori va porshen atrof muhit hisoblanadi.

Adiabatik tizimda atrof muhit bilan energiya almashinmaydi, lekin ish bajariladi. Masalan, issiqlik elektr stansiyasida yuqori haroratli va yuqori bosimli o'ta qizigan bug' issiqlik berilmasa xam turbina parraklarini aylantirib, ish bajaradi.

Modda yoki moddalarning bitta fazasidan tashkil topgan tizim *gomogen tizim* deb ataladi. Gravitatsion, elektromagnitik va boshqa kuchlarning ta'siriga tortilmagan va o'zining barcha qismlarida bir xil xususiyatlarga ega bo'lgan tizim *bir jinsli tizim* deb ataladi.

Ajratuvchi tekislik bilan ajratilgan bir nechta gomogen qismlardan (fazalardan) tashkil topgan tizim *geterogen tizim* deb ataladi.

Termodinamik tizim deb uning ichki holati mustaqil o'zgaruvchilarning ma'lum bir miqdori bilan tavsiflanishi mumkin bo'lgan tizimni atash qabul qilingan, bu mustaqil parametrlarni holat parametrlari deb atash qabul qilingan. Agar termodinamik tizimning holati va uning parametrlari vaqtda o'zgarmasa, u holda tizim muvozanat holatida bo'ladi.

Tizimning muvozanat holati deb tizimning shunday issiqlik, mexanik, kimyoviy yoki boshqa holatiga aytiladiki, bunda tizim tashqi ta'sir bo'lmaganda istalgancha uzoq vaqt davomida mavjud bo'la oladi.

Eng oddiy termodinamik tizim yoki oddiy jism deb muvozanat

holatidagi shunday tizimga aytiladiki, uning fizikaviy holati ikkita mustaqil o‘zgaruvchining qiymatlari bilan to‘liq belgilanadi. Oddiy jismlarga termodinamik muvozanat holatida bo‘lgan va kimyoviy aylanishlarga, gravitatsion va elektromagnitik kuchlarning ta’siriga tortilmagan gazlar, bug‘lar va ko‘pgina qattiq jismlar kiradi.

Ideal gaz – nazariy tizim bo‘lib, uning fizikaviy holati bitta o‘zgaruvchining, aynan esa haroratning qiymatlari bilan to‘liq belgilanadi.

1.2. Holat parametrlari

Holat parametrlari – termodinamik tizimning holatini bir qiymatli tarzda tavsiflaydigan va uning oldingi tarixiga bog‘liq bo‘lmagan fizikaviy kattaliklardir. Termodinamik tizimning holat parametrlari ikkita klass – *intensiv* va *ekstensiv* klassga bo‘linadi. Intensiv xususiyatlar tizimning massasiga bog‘liq bo‘lmaydi, ekstensiv xususiyatlar esa – massaga proporsional bo‘ladi.

Eng oddiy holat parametrlariga quyidagilar kiradi: solishtirma hajm (v), mutlaq bosim (p) va mutlaq harorat (t, T).

Solishtirma hajm **(**v**)** – bu modda miqdori birligining hajmidir, solishtirma hajmga teskari kattalik esa moddaning zichligi (ρ) deb ataladi

$$v = \frac{V}{G}; \qquad \rho = \frac{G}{V}; \qquad v = \frac{1}{\rho}, \tag{1.1}$$

bu yerda V – hajm, m^3; G – moddaning massasi, *kg*; v – solishtirma hajm, m^3/kg; ρ – zichlik, kg$/m^3$.

Modda massasining (G) uning molyar massasiga (μ) nisbati moddaning mollar sonini belgilaydi

$$\overline{G} = \frac{G}{\overline{\mu}}. \tag{1.2}$$

Moddaning kmol hajmi yoki $\bar{v}$ molyar hajm solishtirma hajm bilan quyidagi nisbat orqali bog‘lanadi

$$\bar{v} = \frac{V}{\overline{G}} = \mu v. \tag{1.3}$$

Mutlaq bosim (*p*) kuchning normal tarkib toptiruvchisining bu kuch ta’sir ko‘rsatayotgan maydonga nisbatining chegarasidir

$$p = \lim_{f \to 0}\left(\frac{F_n}{f}\right) = \left(\frac{\partial F}{\partial f}\right)_n, \tag{1.4}$$

CI tizimida bosim Paskallarda o‘lchanadi ($Pa=N/m^2$).

Bosimning turli o‘lchov birliklari orasidagi nisbatni quyidagi jadval orqali ko‘rishimiz mumkin.

Suyuqliklar, bug‘lar va gazlarning bosimi odatda ikkita tipdagi asboblar bilan – mutlaq bosimni aniqlashda – *barometrik* tipdagi asboblar bilan, ortiqcha bosimni – *manometrik* tipdagi asboblar bilan o‘lchanadi. Termodinamikaning hisobiy nisbatlariga faqatgina mutlaq bosim kirishi sababli u manometrik bosim ($p_{man.}$) va atrof muhitning mutlaq bosimining (p_0) yig‘indisi sifatida aniqlanadi.

1.1-jadval

Birliklar	Pa	bar	kg k/sm^2	mm sim.ust.	mm suv ust.
1 Pa	1	10^{-5}	$1{,}02\cdot10^{-5}$	$7{,}5024\cdot10^{-3}$	0,702
1 bar	10^5	1,02	1,02	$7{,}5024\cdot10^{2}$	$1{,}02\cdot10^{4}$
1 kg/sm^2	$9{,}8\cdot10^4$	1	1	735	10^4
1 mm sim.ust.	133	$1{,}36\cdot10^3$	$1{,}36\cdot10^3$	1	13,6
1 mm suv.ust	9,8067	10^{-4}	$7{,}35\cdot10^{-2}$	$7{,}35\cdot10^{-2}$	1

Harorat termodinamik tizimning holatining jismlar o‘rtasida o‘z-o‘zidan issiqlik almashinishini belgilaydigan birdan-bir funksiyasi bo‘lib hisoblanadi.

Termodinamikada haroratlarni o‘lchash uchun yuz gradusli xalqaro Selsiy shkalasidan (*t, °C*) foydalaniladi, holat parametri sifatida esa mutlaq haroratdan (*T, K)* foydalaniladi.

Mutlaq harorat (*T*) termodinamik mutlaq haroratlar shkalasi

bo‘yicha o‘lchanadi, u termodinamikaning differensial nisbatlari asosida tahliliy tarzda quriladi. Termodinamik shkalani amalda qurishda reper nuqtalar sifatida mutlaq nol (*-273,15°C*) va suvning uchlik nuqtasining parametrlari qabul qilinadi. Kelvin va Selsiy harorat shkalalari o‘rtasida quyidagi bog‘lanish mavjud: $T = t + 273,15$

Termodinamik harorat yoki mutlaq harorat - bu termodinamik tizim holatining yagona funksiyasidir, bu jismlar orasidagi o‘z-o‘zidan issiqlik uzatish yo‘nalishini tavsiflaydi.

Molekulyar-kinetik nuqtai nazardan, termodinamik harorat - bu tizimdagi barcha zarralar to‘plamining xaotik, issiqlik harakatining intensivligini tavsiflovchi va bitta zarrachaning ilgarilanma harakatining o‘rtacha kinetik energiyasiga mutanosib bo‘lgan fizik kattalik.

Harorat - bu molekulalarning o‘rtacha kinetik energiyasining o‘lchovidir. Eng muhim natija molekulyar kinetik nazariyaning asosiy tenglamasidan va harorat ta’rifidan kelib chiqadi: mutlaq harorat molekulyar harakatning o‘rtacha kinetik energiyasining o‘lchovidir.

Tenglamalarning chap tomonlari $\frac{pV}{N} = \frac{2}{3}E_{kin}$ va $\frac{pV}{N} = kT$ bir xil. Bu ularning o‘ng tomonlari ham teng bo‘lishi kerakligini anglatadi. Bu molekulalarning ilgarilanma harakatining o‘rtacha kinetik energiyasi va harorat o‘rtasidagi bog‘liqlikni anglatadi:

$$E_{kin} = \frac{2}{3}kT \qquad (1.5)$$

bu yerda:

k = 1.380 6505 × 10^{-23} J/K - Bolsman doimiysi

T - mutlaq harorat, K

Bolsman doimiysi energiya birliklaridagi Θ haroratni Kelvindagi T harorat bilan bog‘laydi. Bu molekulyar-kinetik nazariyaning eng muhim konstantalaridan biridir.

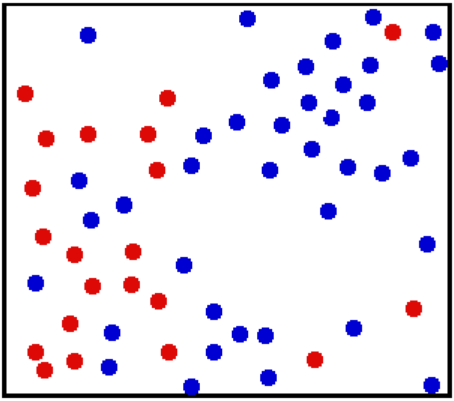
Gaz molekulalarining xaotik harakatining o‘rtacha kinetik energiyasi mutlaq haroratga mutanosibdir. Harorat qancha yuqori bo‘lsa, molekulalar tezroq harakatlanadi. SHunday qilib, harorat va molekulalarning o‘rtacha tezligi o‘rtasidagi bog‘liqlik to‘g‘risida ilgari ilgari surilgan gipoteza ishonchli asosga ega bo‘ldi.

Suyultirilgan gazlar uchun molekulalarning ilgarilanma harakatining (1.1-rasm) harorati va o‘rtacha kinetik energiyasi o‘rtasidagi bog‘liqlik o‘rnatiladi. Biroq, bu atomlar yoki

molekulalarning harakati Nyuton mexanikasi qonunlariga bo‘ysunadigan har qanday moddalar uchun to‘g‘ri keladi. Bu suyuqliklar va qattiq moddalar uchun amal qiladi, unda atomlar faqat kristall panjaraning tugunlarida muvozanat holati atrofida tebranishi mumkin.

Harorat absolyut nolga yaqinlashganda molekulalarning issiqlik harakatining energiyasi ham nolga yaqinlashadi.

Mutlaq harorat haroratning shartsiz o‘lchovi va termodinamikaning asosiy xususiyatlaridan biridir.



1.1-rasm. Xaotik issiqlik harakatida ishtirok etadigan zarralar tizimining oniy holati

Mutlaq harorat tushunchasini V. Tomson (Kelvin) kiritgan, shu bilan bog‘liq holda mutlaq harorat shkalasi Kelvin shkalasi yoki termodinamik harorat shkalasi deb ataladi. Mutlaq harorat birligi Kelvin (K) dir. Mutlaq harorat shkalasi shunday nomlangan, chunki pastki harorat chegarasining asosiy holati quyidagicha:

mutlaq nol - bu mumkin bo‘lgan eng past harorat, unda hech narsa sovuq bo‘lishi mumkin emas va issiqlik energiyasini moddadan olish nazariy jihatdan mumkin emas.

Mutlaq nol 0 K deb belgilanadi, bu taxminan - 273,15 °C. 1 Kelvin bir daraja Selsiyga teng (Kelvin bir daraja Selsiyga teng emas).

Harorat turli termometrik asboblar – o‘zgarmas bosim ga ega bo‘lgan (r=const) suyuqlikli yoki gazli termometrlar bilan o‘lchanadi,

bu yerda jismning harorati yoki doimiy hajmi (v = *const*) o‘zgarganda uning hajmining o‘zgarishi sodir bo‘ladi, bu yerda jismning harorati o‘zgarganda bosimning o‘zgarishi sodir bo‘ladi. Bundan tashqari, harorat qarshilik termometrlari bilan – bu yerda jismning harorati o‘zgarganda datchikning elektr qarshiligi o‘zgaradi, optik pirometrlar bilan - bu yerda jismning haroratdan nurlanish shiddati va nurlanish to‘lqinining uzunligi o‘rtasidagi bog‘lanishdan foydalaniladi va hokazolar bilan o‘lchanadi.

Oddiy jismning holatini tavsiflaydigan parametrlar o‘rtasidagi $F(r, v, T) = 0$ bog‘lanish holat tenglamasi deb ataladi.

1.2-jadval

Shkala-lar nomi	**Selsiy shkalasi t,**	**Renkin shkalasi T, ^{0}Ra**	**Farengeyt shkalasi, t,**	**Reomyur shkalasi t, ^{0}R**
Selsiy shkalasi t, ^{0}C	-	5/9T^{0}Ra-273,15	t, -32/1,8	1,25 t ^{0}R
Renkin shkalasi T, ^{0}Ra	1,8(t +273,15)	-	T ^{0} F+459,7	1,8(1,25t^{0}R+273,15)
Farengeyt shkalasi, t, ^{0}F	1,8 t+32	T^{0}Ra-459	-	9/4 t^{0}Ra
Reomyur shkalasi t, ^{0}R	0,8 t	0,8(5/9T^{0}Ra-273,15)	4/9(t ^{0}F-32)	-

1.3. Termodinamik jarayonlar

Agar tizim atrof muhit bilan ish yoki issiqlik almashinish yo‘li bilan o‘zaro ta’sirlashishga kirishsa, uning holati o‘zgaradi, ya’ni termodinamik jarayon sodir bo‘ladi.

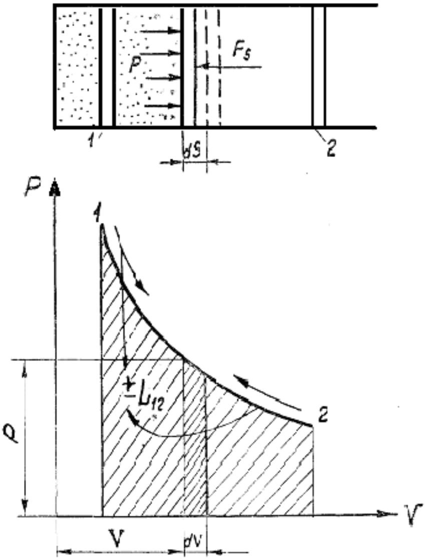
Muvozanatli jarayon deb tizimning muvozanat holatlarining uzluksiz ketma-ketligiga aytiladi (tizimning barcha qismlari har qanday vaqt momentida bir xil p, v, T parametrlarga ega bo‘ladi).

Nomuvozanatli jarayonda tizimning parametrlari muvozanat

holatida bo‘lmaydi, ya’ni tizimning turli qismlari turlicha *p, v, T* parametrlarga ega bo‘ladi.

Har qanday real jarayon ko‘p yoki kam darajada nomuvozanatli bo‘lib hisoblanadi, biroq, umuman olganda, bu nomuvozanatlilikni jarayonning amalga oshish tezligini kamaytirish natijasida istalgancha kichik qilish mumkin. SHunday qilib, muvozanatli jarayon bu jarayonning tezligi nolga qarab intilganda nomuvozanatli jarayonning eng chekka holati bo‘lib hisoblanadi.

Muvozanatli jarayonlarni *p-v, r-T* va hokazo yassi holat diagrammalarida grafik tarzda tasvirlash mumkin. Jarayonda parametrlarning o‘zgarishini tasvirlaydigan chiziq jarayonning egri chizig‘i deb ataladi (masalan, 1.2-rasmdagi 1-2 egri chiziq).



1.2- rasm. Qaytar jarayonda hajmning o‘zgarishida termodinamik ish.

Jarayonning egri chizig‘ining har bir nuqtasi tizimning muvozanat holatini tavsiflaydi.

Uning davomida tizimning harorati o‘zgarmasdan saqlanadigan muvozanatli jarayon izotermik jarayon deb ataladi.

O‘zgarmas bosimda kechadigan jarayon izobarik jarayon deb, o‘zgarmas hajmda kechadigan jarayon esa – izoxorik jarayon deb ataladi.

Atrof muhit bilan issiqlik almashinishsiz kechadigan muvozanatli jarayon adiabatik jarayon deb ataladi. *Qaytar jarayon* deb shunday muvozanatli jarayonga aytiladiki, u mazkur tizimning teskari jarayon yo‘li bilan oxirgi holatdan boshlang‘ich holatga qaytishiga yo‘l qo‘yadi.

To‘g‘ri va teskari qaytar jarayonlar natijasida tizimda va tashqi muhitda qandaydir bir qoldiq o‘zgarishlar sodir bo‘lmaydi. Qaytar jarayonlar – bu maksimal kengayish va minimal siqilish ishiga ega bo‘lgan ideallashtirilgan jarayonlardir. Bunday jarayonlar faqatgina jarayonning har bir nuqtasida tizimning muvozanat holati saqlangan taqdirda sodir bo‘ladi va shu sababli faqatgina muvozanatli jarayon qaytar jarayon bo‘lishi mumkin.

Muvozanatli jarayonlarni grafik tarzda tasvirlash mumkin, nomuvozanatli jarayonlar grafik tarzda tasvirlashga berilmaydi.

1.4. Termodinamik ish

Ish o‘zida energiyani uzatish usullaridan birini taqdim qiladi. Qaytar jarayonning elementar ishi mexanikada odatda ko‘rib chiqilayotgan jismga ta’sir ko‘rsatuvchi (G‘) umumlashtirilgan kuchning (F_s) proeksiyasining bu kuch qo‘yilgan nuqtaning siljish kattaligiga (d) ko‘paytmasi sifatida ta’riflanadi

$$\delta L = F_s \cdot ds, \tag{1.6}$$

Bu yerda F_s va ds – mustaqil o‘zgaruvchilar.

(1.6) tenglamadan shu narsa kelib chiqadiki, ishning sonli qiymati jarayonning yo‘liga (turiga) bog‘liq bo‘ladi va shundan kelib chiqqan holda, to‘liq differensial bo‘lib hisoblanmaydi. SHu sababli elementar ishni yozish uchun (δ) cheksiz kichik kattalik belgisidan foydalaniladi.

Silindrda joylashgan siqiladigan jism uchun (gaz yoki bug‘) (1.2-rasm) porshenning yuzasiga ta’sir qiluvchi kuch bosimning uning ko‘ndalang kesim yuzasiga (f) ko‘paytmasiga teng bo‘ladi:

$$F_s = p \cdot f\,.$$

Gaz porshenni *ds* masofaga ko‘chirish uchun tashqi bosim kuchlariga qarshi sarflaydigan ish, (1.6) ifodaga muvofiq $\delta L = pfdS$. Lekin $fdS = dV$ ga teng bo‘ladi va shundan kelib chiqqan holda,

$$\delta L = pdV\,, \qquad (1.7)$$

bu yerda δL – hajmning qaytar o‘zgarishida elementar termodinamik ish, J.

Hajmning qaytar o‘zgarishining δl (*J/kg*) solishtirma elementar termodinamik ishi quyidagi nisbat bilan aniqlanadi:

$$\delta l = \frac{\delta L}{G} = \frac{pdV}{G} = pdv\,. \qquad (1.8)$$

To‘liq ($L_{1,2}$), yoki solishtirma ($l_{1,2}$) ishning integral qiymatlarini hisoblash uchun $\varphi = (p,V) = 0$ shaklida jism holatining o‘zgarish jarayonlarining tenglamasi yoki uning *p–V* yoki *p–v* holat diagrammalaridagi grafik tasviri berilgan bo‘lishi lozim.

p = const bo‘lgan xususiy holatda (izobarik jarayon) quyidagiga ega bo‘lamiz:

$$L_{1,2} = \int_1^2 p\,dV = p(V_2 - V_1); \qquad (1.9)$$

$$l_{1,2} = \int_1^2 p\,dv = p(v_2 - v_1). \qquad (1.10)$$

1.2-rasmdan ko‘ra ish - ishchi jism va uning xususiyatlaridan qat’iy nazar, jarayonning egri chizig‘i ostidagi maydon bilan belgilanadi. SHu bois *p–V* va *p–v* koordinatalar *universal koordinatalar* deb ataladi.

Kengayish ishi musbat deb ($dv > 0,\ \delta l > 0$), siqilish ishi esa – manfiy ($dv < 0, \delta l < 0$) deb hisoblanadi.

Real jarayonning samarali ishi hajm o‘zgarishining qaytar ishi δL^* va qaytmaydigan yo‘qolishlarning farqiga teng

$$\delta L^{*} = \delta L + \delta L^{*} \tag{1.11}$$

Qaytmas jarayonlarda yo‘qolgan ish (δL^{**}) ichki issiqlik almashinishining issiqligiga aylanadi.

1.5. Jismning ichki energiyasi

Ichki energiya o‘zida jismning energiyasining to‘liq zahirasini taqdim qiladi va molekulalarning ilgarilanma-qaytar va aylanma harakatining energiyasi, ichki molekulyar tebranishlarning energiyasi, molekulalarning tishlashish kuchlarining potensial energiyasi, ichki molekulyar energiya va ichki atom energiyasidan tashkil topadi.

U ichki energiya holatning funksiyasi bo‘lib hisoblanadi, u jarayonning yo‘liga bog‘liq bo‘lmaydi, uning elementar o‘zgarishi (*dU*) to‘liq differensial belgisi bilan belgilanadi.

Ichki energiya *J* larda, solishtirma energiya (*u*) esa - *J/kg* larda o‘lchanadi.

Oddiy jismlar uchun ichki energiya ikkita mustaqil o‘zgaruvchining (*p, T*; yoki *p, v* yoki *T, v*) funksiyasi sifatida aniqlanadi. Ideal gazlar uchun ichki energiya birgina haroratga bog‘liq ravishda aniqlanadi.

1.6. Issiqlik

Issiqlik – issiqlik o‘tkazuvchanlik yoki radiatsiya (nurlanish) vositasida bir jismdan boshqasiga uzatiladigan energiya miqdoridir Issiqlikning uzatilish jarayoni issiqlik almashinishi deb ataladi.

Issiqlik almashinishi natijasida jism tomonidan olinadigan Q issiqlik miqdori termodinamik jarayonning turiga bog‘liq bo‘ladi va xuddi ish kabi jarayonning funksiyasi bo‘lib hisoblanadi. SHu sababli elementar issiqlik miqdori to‘liq differensial bo‘lib hisoblanmaydi va δ (δQ) belgisi bilan belgilanadi.

Q issiqlik miqdori Joullarda o‘lchanadi, $q = Q/G$ solishtirma issiqlik miqdori esa *J/kg* larda o‘lchanadi.

1.7. Jismning issiqlik sig‘imi

Issiqlik sig‘imi deb uning harorati *1°S* ga o‘zgarishi uchun modda miqdorining birligiga berilishi kerak bo‘lgan issiqlik miqdoriga aytiladi.

Issiqlik unga tegishli bo‘lgan moddaning miqdorini aniqlash usuliga bog‘liq ravishda *kJ/(kgK)* da o‘lchanadigan *s* massa issiqlik sig‘imi, $\bar{c}$ – *kJ/(kmolK)* da o‘lchanadigan $\bar{c}$ molyar issiqlik sig‘imi va *kJ/(m*^{3}*K)* da o‘lchanadigan *s'* hajmiy issiqlik sig‘imi ajratiladi.

Massa, molyar va hajmiy issiqlik sig‘imi o‘rtasida bir qiymatli bog‘lanish mavjud

$$\bar{c} = c\mu; \qquad c' = \rho c. \tag{1.12}$$

Gazlarning issiqlik sig‘imi termodinamik jarayonga bog‘liq bo‘ladi, bunda issiqlik yoki beriladi, yoki olib ketiladi. Jarayon odatda qaysidir bir *z = p, V,...* holat parametri o‘zgarmaydigan qilib beriladi. Agar jarayon z = const shart bilan berilgan bo‘lsa, u holda bu jarayonda issiqlik sig‘imi quyidagiga teng bo‘ladi:

$$c_z = \frac{\delta q_z}{dt}. \tag{1.13}$$

Bu issiqlik sig‘imi haqiqiy issiqlik sig‘imi deb ataladi.

Uning qiymatini eksperimental tarzda aniqlashda odatda ikkita jarayondan – doimiy hajmda kechadigan jarayon (c_V izoxorik issiqlik sig‘imi) va o‘zgarmas bosimda kechadigan jarayondan (c_p izobarik issiqlik sig‘imi) foydalaniladi.

Real gazning issiqlik sig‘imi uning holatining parametrlariga, masalan, harorat va bosimga bog‘liq bo‘ladi. Ideal gazning issiqlik sig‘imi faqatgina haroratga bog‘liq bo‘ladi.

Amaliy hisoblashlar uchun t_1 dan t_2 gacha haroratlar oralig‘iida o‘rtacha issiqlik sig‘imi tushunchasi kiritiladi, u butun ko‘rib chiqilayotgan haroratlar oralig‘ii uchun bir xil bo‘ladi (s_{zm}).

(1.13) tenglamadan shu narsa kelib chiqadiki, 1-2 jarayonda jismga olib kelingan (yoki undan olib ketilgan) issiqlik miqdori quyidagi munosabat bilan aniqlanadi

$$q_{1-2} = \int_1^2 c_z dt = c_{zm}(t_2 - t_1), \tag{1.14}$$

bundan

$$c_{zm} = \frac{q_{1-2}}{(t_2 - t_1)}. \qquad (1.15)$$

(1.14) munosabatdan ko‘rinib turibdiki, jarayonda jism tomonidan olingan (yoki berilgan) issiqlik miqdorini hisoblash uchun t_1 dan t_2 gacha haroratlar oralig‘iida uning o‘rtacha issiqlik sig‘imini bilish zarur bo‘ladi, aksariyat gazlar uchun ularning qiymatlari maxsus termodinamik jadvallarda keltirilgan.

Gazlarning o‘rtacha issiqlik sig‘imini shuningdek agar haqiqiy issiqlik sig‘imining tenglamasi ma’lum bo‘lsa ham hisoblash mumkin. Ba’zi bir gazlar uchun ma’lum bir haroratlar oralig‘iida haqiqiy issiqlik sig‘imi chiziqli qonun bo‘yicha o‘zgaradi

$$c_z = a_z + b_z t, \qquad (1.16)$$

bu ifodani (1.16) tenglamaga o‘rniga qo‘yish bilan quyidagini olamiz

$$c_{zm} = \frac{\int_1^2 (a_z + b_z t)dt}{(t_2 - t_1)} = a_z + b_z \frac{(t_1 + t_2)}{2}, \qquad (1.17)$$

bu yerda c_{zm} birinchi o‘rtacha issiqlik sig‘imi deb ataladi. U son jihatidan jarayonning o‘rtacha arifmetik haroratida haqiqiy issiqlik sig‘imiga teng bo‘ladi.

Masalalar

1. Erda turgan samolyotning ochiq kabinasiga moy bosimini o‘lchash uchun o‘rnatilgan manometr 6 kg/sm^2 ortiqcha bosimni ko‘rsatyapti. Barometrik bosim 752 mm simob ustuniga teng.

1.1. Moyning mutlaq bosimini N/m^2, MPa, mm simob ustunida ifodalang.

1.2. Samolyot balandlikka ko‘tarilganda mutlaq bosim o‘zgarmagandagi manometr ko‘rsatkichini toping. Barometrik bosim 442,5 mm simob ustuniga teng.

2. Bug‘ turbinasi kondensatorida mutlaq bosim P=0,004 MPa ga teng. Agar barometr 735 va 764 mm simob ustuniga teng bo‘lgan holatda vakuum bosimlarni kPa da aniqlang.

3. Kichik ortiqcha va vakuum bosimlarni o‘lchashda mikromanometrlar ishlatiladi (1.2-rasm).

$\alpha=30^o$ burchak ostida joylashgan mikromanometr naychasidagi suyuqlik balandligi 180 mm bo‘lganda mutlaq bosimni MPa va mm simob ustunida aniklang. Ishchi suyuqlik – spirtning zichligi $\rho=0,8$ g/sm^3, barometr ko‘rsatkichi 0,102 MPa.

1.2-rasm. Mikromanometr

4. Idishda 300 kg suv bug‘i joylashgan. Bug‘ning solishtirma hajmi V=20,2 sm^3/g ga teng bo‘lgandagi idishning hajmini aniqlang.

5. Farengeyt shkalasida o‘lchangan haroratlarni Selsiy gradusiga aylantiring.

-273 ^{o}F, 24 ^{o}F , 162 ^{o}F, 1465 ^{o}F

6. Selsiy gradusida o‘lchangan haroratlarni Farengeyt shkalasiga aylantiring.

– 186 ^{0}C; - 12 ^{0}C; 127 ^{0}C; 893 ^{0}C.

7. Farengeyt va Selsiy shkalalaridagi bir xil qiymatga ega haroratni aniqlang. Selsiy gradusida bu harorat necha gradusga teng?

8. Inson tanasi harorati Farengeyt shkalasida 100 ^{o}F ga teng deb olingan. Selsiy shkalasida bu nechaga teng bo‘ladi?

9. Mutlaq nol Farengeyt shkalasida nechaga teng?

10. Antarktikada 1980 yil eng sovuq harorat -84 ^{o}C ga teng bo‘lgan. Bu harorat Farengeyt shkalasida nechaga teng bo‘ladi?

11. Uglerod oksid gazining hajmi o‘zgarmaganda $(\mu c_{rm})_0^{1200}$=32,192 kJ/kmol·gr bo‘lgandagi 0÷1200^{0}C haroratlar oralig‘i-dagi o‘rtacha massaviy va o‘rtacha hajmiy issiqlik sig‘imini aniqlang, Echish: μc_r-μc_v=μR≈8,314 kJ/kmol·gr ifodasidan $\mu cv\int_0^{1200}$ ni aniqlaymiz:

$$\mu c_v \int_0^{1200} = \mu c_r \int_0^{1200} - 8{,}314 = 32{,}192 - 8{,}314 = 23{,}877 \text{ kJ/kmol·gr}$$

$$\mu c_{vm} \int_0^{1200} = \frac{\mu C_v \int_0^{1200}}{\mu_{co}} = \frac{23{,}877}{28} = 0{,}8528 \text{ kJ/kg·gr}$$

$$\mu c_{vm} \int_0^{1200} = \frac{\mu C_v \int_0^{1200}}{22{,}4} = \frac{23{,}877}{22{,}4} = 1{,}0659 \text{ kJ/m}^3\text{·gr.}$$

12. Havoning issiqlik sig‘imi haroratga bog‘liq emas deb hisoblab, uning doimiy bosimdagi va doimiy hajmdagi, massaviy va hajmiy issiqlik sig‘imlarini aniqlang.

Javob: c_v=0,722 kJ/kgK*;* c_r=1,012 kJ/kgK*;*
$c^1 v$=0,935 kJ/kgK*;* $c^1 r$=1,308 kJ/kgK.

13. Harorat bog‘liqligiga e’tibor bermasdan kislorodning doimiy hajmdagi va doimiy bosimdagi massaviy issiqlik sig‘imini aniqlang.

Javob: c_v=0,655 kJ/kgK ; c_r=0,916 kJ/kgK

14. 200÷800^{0}C haroratlar oralig‘idagi bosim o‘zgarmaganda havoning o‘rtacha issiqlik sig‘imini aniqlang, bunda ssiqlik sig‘imini haroratga bog‘liqligini chiziqli emas deb hisoblang.

Javob. $c_{rm} \int_{200}^{800}$ = 1,091 kJ/kg·gr .

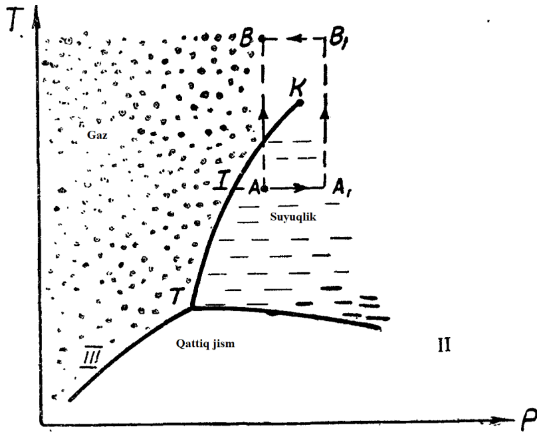
Nazorat savollari

1. Texnik termodinamika tushunchasini tushuntiring?
2. Termodinamik tizim nima?
3. Ochik, yopik, yakkalangan va adiabatik jarayonlar deb nimaga aytiladi?
4. Energiyaning ta’rifi qanday?
5. Termodinamik parametrlar deb nimaga aytiladi? Termik parametrlarni tushuntirib bering.
6. Ish, ichki energiya, issiqlik haqida tushuncha bering.
7. Ichki energiyani holat parametrlari funksiyasi sifatida tasavvur qila olasizmi?
8. Termodinamik tizim bajargan ishni ko‘rib chiqing.

2. Moddaning fizikaviy holati

Oddiy tizimlarning uchta – qattiq, suyuq va gazsimon agregat holatlari ajratiladi.

Faza diagrammasi yordamida jismning bir agregat holatdan boshqasiga o‘tishini ko‘rish mumkin. Sof moddaning faza holatlari diagrammasini ko‘rib chiqamiz (2.1- rasm).



2.1-rasm. Sof moddaning faza holatlari P-T diagrammasi

Faza aylanishlari chiziqlari (bug‘lanish I, erish II, sublimatsiya III) ikki fazali tizimlarning termodinamik muvozanatini aks ettiradi va diagrammani turli agregat holatlari sohalariga bo‘ladi.

Tizimning fazalari deb ajratuvchi tekisliklar bilan chegaralangan sohalarga aytiladi.

Faza aylanishlari chiziqlarida bosim bilan harorat o‘rtasida bir qiymatli bog‘lanish mavjud. Bu chiziqlar bu yerda modda bir paytning o‘zida uchta agregat holatida bo‘ladigan uchlik nuqtada kesishadi. Uchlik nuqtaning parametrlari moddaning termodinamik konstantalariga tegishli bo‘ladi.

Suyuqlik bilan bug‘ o‘rtasidagi energetik chegara *bug‘lanish issiqligi*, qattiq jism va suyuqlik o‘rtasidagi chegara esa *erish issiqligi* bo‘lib hisoblanadi. Bug‘lanish va erish jarayonlari doimiy haroratda kechishi sababli, bug‘lanish, erish va sublimatsiya haroratlari izotermik

aylanishlarning issiqliklari bo‘lib hisoblanadi. Ular r belgi bilan belgilanadi va *faza aylanishlari issiqligi* deb ataladi.

Termodinamikada texnik hisoblashlarni bajarish uchun suyuqlik va bug‘ eng katta qiziqish uyg‘otadi. Bosim ortishi bilan ularning xususiyatlaridagi termodinamik farq sezilarli darajada kamayadi va $(r=0)$ kritik nuqtada to‘liq yo‘qoladi.

Kritik parametrlar moddaning eng muhim termodinamik doimiylari bo‘lib hisoblanadi.

Kritik harorat tushunchasi D.I. Mendeleev tomonidan kiritilgan. T_k kritik harorat – bu unda va undan yuqorida gazni hech qanday siqish bilan suyuq holatga o‘tkazib bo‘lmaydigan haroratdir. p_k kritik bosim to‘yingan bug‘ning maksimal qayishqoqligiga mos keladi, kritik hajm esa o‘zida berilgan modda miqdorining suyuq holatda maksimal hajmini taqdim qiladi.

Kritik sohadan keyin $(p > p_k; T > T_k)$ modda faqatgina bir fazali holatda bo‘lishi mumkin. *A* holatdan *V* holatga o‘tish eng qisqa yo‘l bilan, *AV* chiziq bo‘yicha sodir bo‘lishi mumkin. Bu o‘tishni kritik sohadan keyingi sohada ham, ya’ni agregat holatni o‘zgartirmasdan, masalan, AA_1B_1B chiziq bo‘yicha ham amalga oshirish mumkin (2.1-rasm).

Moddaning bir fazali holatining uzluksizligining shartli alomati uning har qanday bir fazali boshlang‘ich holatdan uzluksiz o‘zgarishlar yo‘li bilan, fazaviy energetik to‘siqlarni aylanib o‘tgan holda, ya’ni faza aylanishlari chiziqlarini kesib o‘tmasdan boshqa bir fazali holatga o‘tishi mumkinligi bo‘lib hisoblanadi.

SHu sababli, umuman olganda, oddiy jismlar (bir jinsli tizimlar) uchun moddaning har qanday bir fazali holatini tasvirlaydigan $F(p,v,T)=0$ yagona holat tenglamasi mavjud bo‘lishi lozim. Biroq bunday tenglama hozircha olinmagan. Quyida ideal va real gazlarning holat tenglamalarini ko‘rib chiqamiz.

Nazorat savollari

1. Jismni bir fazadan ikkinchi fazaga o‘tishi nima deb ataladi?
2. Kritik harorat nima?
3. Sof moddaning faza holatlarini P-T diagrammasini tushuntirib bering.

3. Ideal va real gazlarning qonunlari

Ideal gaz deb ularning molekulalari o‘zida moddiy nuqtalarni taqdim qiladigan va molekulalar o‘rtasida o‘zaro ta’sirlashish kuchlari bo‘lmaydigan gazlarga aytiladi.

Nisbatan past bosim va yuqori haroratlarda real gazlar kichik zichlikka ega bo‘ladi va ma’lum bir yo‘l qo‘yilish bilan ularga ideal gazlar sifatida qarash mumkin.

Ideal gazlarning qonunlari XVII–XIX asrlarda eksperimental yo‘l bilan atmosfera bosimiga yaqin bosimlarda gazlarning o‘zini qanday tutishini o‘rgangan olimlar tomonidan aniqlangan.

Boyl (*1662 y.*) – *Mariott* (*1676 y.*) *qonuni*: o‘zgarmas haroratda ideal gazning mutlaq bosimi va solishtirma hajmining ko‘paytmasi doimiy kattalik bo‘ladi, ya’ni ideal gazning mutlaq bosimi va solishtirma hajmining ko‘paytmasi faqatgina gazning haroratiga bog‘liq bo‘ladi:

$$t = const \text{ bo‘lganda } pv = copst. \qquad (3.1)$$

Gey Lyussak qonuni (*1802 y.*) – bosim o‘zgarmas bo‘lganda ($p=const$) ideal gazlarning nisbiy kengayishi haroratning ortishiga proporsional bo‘ladi.

$$\frac{v - v_0}{v_0} = \alpha(t - t_0), \qquad (3.2)$$

$$t_0 = 0°; \quad \alpha_0 = 1/273.15 \ °C^{-1}; \quad v = v_0(1 + \alpha_0 t), \qquad (3.3)$$

bu yerda v – t ^{0}C harorat va p bosimda gazning solishtirma hajmi; v_0 – t_0 = 0 ^{0}C haroratda gazning solishtirma hajmi; α_0 – t_0 = 0 ^{0}C haroratda ideal gazlarning hajmiy kengayish harorat koeffitsiyenti, barcha bosimlarda xuddi o‘sha bitta qiymatni saqlaydi va barcha ideal gazlar uchun bir xil bo‘ladi.

Bu qonunlarni solishtirish bilan ideal gazlarning holat tenglamasi – *Klapeyron tenglamasi* (*1834 y.*) chiqariladi:

$$\text{1 kg gaz uchun} \qquad pv = RT, \qquad (3.4)$$

G kg gaz uchun $$pV = GRT, \quad (3.5)$$

bu yerda R – gazning tavsifiy doimiysi; T – gazning mutlaq harorati

$$T = \frac{pv}{R} = t + \frac{1}{\alpha_0} = t + 273{,}15\ {}^{0}K. \quad (3.6)$$

Klapeyron tenglamasini o‘zgarmas bosimda differensiallash bilan quyidagini olamiz:

$$\delta l_p = pdv = RdT,$$

bundan

$$R = \frac{\delta l_p}{dT} \quad (3.7)$$

bu - *gazning universal doimiysi* (R) – izobarik jarayonda ($p=const$) gazning harorati bir gradusga o‘zgargandagi 1 kg gazning solishtirma ishini anglatadi.

Avogadro qonuni **(***1811 y.***)** – bir mol gazning hajmi uning tabiatiga bog‘liq bo‘lmaydi va gazning $\bar{v} = f(p,t)$ holat parametrlari bilan to‘liq belgilanadi.

Klapeyron tenglamasidan bir mol ideal gaz uchun quyidagiga ega bo‘lamiz:

$$\bar{v} = \mu v = \mu R\frac{T}{p} = \bar{R}\frac{T}{p}, \quad (3.8)$$

bu yerda $\bar{R} = \mu R = 8314$, *J/kmol, R – universal gaz doimiysi.*

YAkunda holat tenglamalarining quyidagi ifodalariga ega bo‘lamiz:

1 kmol gaz uchun $$p\bar{v} = \bar{R}T; \quad (3.9)$$

$\bar{G}$ kmol gaz uchun $$pV = \bar{G}\bar{R}\bar{T}, \quad (3.10)$$

bu tenglamalar Klapeyron – Mendeleev tenglamalari deb ataladi.

Joul qonuni – ideal gazning ichki energiyasi faqatgina haroratga bog‘liq bo‘ladi.

$$u = u(T); \qquad \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = 0. \qquad (3.11)$$

Real gazning nazariy asoslangan yagona holat tenglamasining yo‘qligi ko‘p sonli empirik va yarim empirik holat tenglamalarining dunyoga kelishiga sabab bo‘lgan, ular alohida gazlar uchun ularning holat parametrlari o‘zgarishining chegaralangan diapazonida adolatli bo‘ladi.

Tenglama qanchalik aniq bo‘lsa, u shunchalik ko‘p individual konstantalarni o‘z ichiga oladi (qoidaga ko‘ra). Masalan Van-der-Vaalsning mashhur holat tenglamasi ikkita konstantani o‘z ichiga oladi, yanada aniqroq tenglamalarda esa konstantalarning soni o‘ntagacha va undan ham ko‘proqqa etadi.

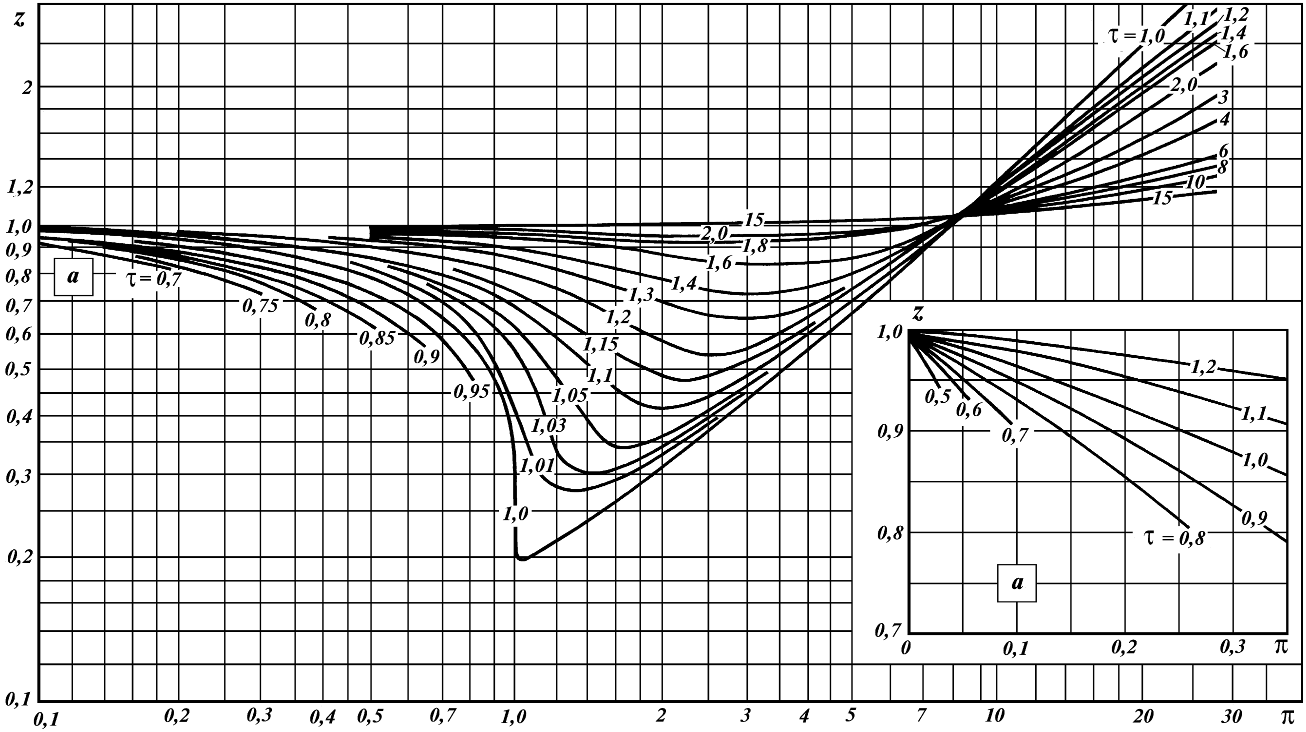
Muhandislik hisoblashlarida ko‘pincha unga *siqiluvchanlik koeffitsiyenti* deb ataluvchi (z) tuzatish koeffitsiyentini kiritish bilan ideal gazning holat tenglamasidan foydalaniladi.

$$pv = zRT \qquad (3.12)$$

(z) siqiluvchanlik koeffitsiyenti real gazning hajmining ideal gazning hajmidan chetlashishini hisobga oladi (ideal gaz uchun $z=1$).Siqiluvchanlik koeffitsiyenti bosim va haroratning funksiyasi bo‘lib hisoblanadi va gazning tabiatiga bog‘liq bo‘ladi.

Turli gazlarning siqiluvchanlik koeffitsiyentlari bo‘yicha ma’lumotlarni umumlashtirish uchun Van-der-Vaals tomonidan ifodalangan “mos keluvchi” holatlar tamoyilidan foydalanilgan, u kritik holat haqiqatan ham barcha moddalar uchun bir xil yoki mos keluvchi holat bo‘lib hisoblanishini tasdiqlaydi.

Haqiqatan ham, kritik nuqtada barcha moddalar uchun r=0, $\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v = 0$, $\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_v = 0$, $\left(\frac{\partial^2 p}{\partial v^2}\right)_T = 0$ bo‘ladi va shundan kelib chiqqan holda ikkita modda kritik nuqtadan bir xil uzoqlikda mos keluvchi holatlarda bo‘ladi deb taxmin qilish mumkin.



3.1-расм. Углеводород газларининг сиқилувчанлик коэффициентининг келтирилган параметрларга боғланиши.

Kritik nuqtadan uzoqlik darajasi keltirilgan parametrlar yordamida aniqlanadi:

- keltirilgan bosim $\pi = \dfrac{p}{p_k}$;
- keltirilgan harorat $\tau = \dfrac{T}{T_k}$;
- keltirilgan hajm $w = \dfrac{v}{v_k}$.

$F(w,\pi,\tau)=0$ ko'rinishda yozilgan holat tenglamasi *keltirilgan holat tenglamasi* deb ataladi. U moddaning individual konstantalarini o'z ichiga olmaydi.

Moddaning ular bir xil π va τ larga ega bo'ladigan holatlari mos keluvchi holatlar deb ataladi.

Mos keluvchi holatlar qonuniga bo'ysunuvchi moddalar *termodinamik o'xshash moddalar* deb ataladi.

π va τ parametrlarni bilish bilan 3.1-rasmdagi ma'lumotlar bo'yicha z siqiluvchanlik koeffitsiyenti aniqlanadi.

Masalalar

15. Azotning boshlang'ich parametrlari: t=200 ^{0}C, ν =1,9 m^3/kg. Azot o'zgarmas bosimda qizdiriladi. Bunda hajmi 5,7 m^3/kg ga o'zgaradi. Oxirgi haroratni toping.

16. Silindrda kislorod t=80 ^{0}C va 427 gPa vakuum bosimda joylashgan. Kislorod o'zgarmas haroratda R_{ort}=1,2 MPa bosimga siqiladi. Barometrik bosim R_{bar}= 993 gPa. Kislorodning hajmi necha marta kamayadi?

17. Azotning xona haroratidagi (t=20^{0}C) mutloq bosimi P=2,2 MPa ga teng. Idishdagi azot qizdiriladi, bunda maksimal bosim P_{ort}= 6 MPa ga teng bo'lganda xavfsiz ish bajariladi.

Azotni qizdirish mumkin bo'lgan haroratni aniqlang. Barometrik bosim 1000 gPa.

18. 2,3 MPa bosim va 280 ^{0}C haroratda kislorodning solishtirma hajmini aniqlang.

19. Azotning harorati t = 400^{0}C bo'lganda 1 va 6 MPa bosimlarda uning zichligini toping.

20. t = 20 ^{0}C va P=1,5 MPa da havoning zichligi aniqlansin.

21. Normal sharoitda 0,03 m^3 kislorod 650 sm^3 hajmli idishda joylashgan. Idishdagi bosimni aniqlang. Kislorodning harorati t = 200 ^{0}C. Atmosfera bosimi 1016 gPa.

22. t=800 ^{0}C haroratda va P=0,1 MPa bosimda zichligi ρ=0,447 kg/m^3 bo‘lgan gazning zichligini aniqlang. Bu qaysi gaz?

23. Kompressorning 3 m^3 hajmli zahira idishida kislorod bor. Idishdagi harorat 15^{0}C dan 30 ^{0}C gacha va ortiqcha bosim 0,01 dan 0,6 MPa gacha ortadi.

Idishdagi kislorodning massasi topilsin. Barometrik bosim 993 gPa.

24. Argon solinadigan 40 dm^3 bo‘sh idishning massasi 64 kg, t=15 ^{0}C haroratda P=15 MPa bosimgacha argon bilan to‘ldirilayotgan ballonning massasini aniqlang. Agar ballon t=25 ^{0}C haroratli xonaga joylashtirilsa, bosim qanday o‘zgaradi?

Nazorat savollari

1. "Ideal gaz" ning ta’rifi qanday?
2. Gaz qonunlarini ifodalarini yozib tushuntiring.
3. Ideal va real gazlar holat tenglamalarini tushuntiring bering.
4. Gaz doimiysi nima?

4. Termodinamikaning birinchi asosi

Termodinamikaning birinchi asosi – bu energiyaning saqlanish va aylanish qonunining miqdoriy ifodalanishidir.

Energiyaning saqlanish va aylanish qonuni tabiatning universal qonuni bo‘lib hisoblanadi va uni barcha hodisalar va jarayonlarga nisbatan qo‘llash mumkin. U shunday deydi: *„tizimda sodir bo‘ladigan har qanday jarayonlarda izolyasiyalangan tizimning energiya zahirasi o‘zgarmasdan qoladi; energiya bordan yo‘q bo‘lmaydi va yo‘qdan bor bo‘lmaydi, u faqatgina bir ko‘rinishdan boshqasiga o‘tadi".*

Termodinamika – energiyaning aylanishlari to‘g‘risidagi fanning ajralib turuvchi chizgisi bu tizimning holatining koordinatalari va haroratning funksiyalari sifatida jismlarning ichki energiyasi tushunchasining kiritilishi bo‘lib hisoblanadi.

Har qanday makroskopik jarayonga jarayonda qatnashuvchi jismlarning (termodinamik tizimning) ichki energiyasining o‘zgarishi hamrohlik qiladi. Termodinamikaning hisobiy munosabatlariga faqatgina holatning funksiyalari sifatidagi ichki energiyaning o‘zgarish kattaliklari ($du, \Delta u$) kiradi. SHu bois ichki energiya har doim qabul qilingan shartli hisoblash darajasidan boshlab (masalan, 0 ^0C va 0,1 *MPa*) hisoblanadi.

Termodinamika yaratilishida shuningdek jismlar o‘rtasidagi barcha mumkin bo‘lgan o‘zaro ta’sirlashishlar natijasida faqatgina issiqlikning ishga uzatilishiga keltiriladi deb qabul qilinadi. Bunda shuni qayd qilish zarurki, issiqlik almashinishidan farqli o‘laroq, ish - hodisalarning qaytar kechish sharoitlarida energetik o‘zaro ta’sirlashishning shakli sifatida to‘liq o‘zaro aylanishlarning bo‘lishi mumkinligiga yo‘l qo‘yadi.

4.1. Termodinamikaning birinchi asosi energiyaning saqlanish qonunining matematik ifodalanishi sifatida

Issiqlik almashinishi va ishning uzatilishi energiya uzatilishining birdan-bir turi bo‘lib hisoblanishi sababli, issiqlik va ishning tashqi balansi bo‘yicha termodinamikaning birinchi asosi energiyaning saqlanish qonunining matematik ifodalanishi sifatida quyidagicha talqin qilinadi: *«jism yoki jismlar tizimining ichki energiyasining o‘zgarishi olingan yoki uzatilgan issiqlik va ishning algebraik*

yig'indisiga teng, yoki boshqacha qilib aytganda, tizim tashqaridan olgan issiqlik (Q^*)*, tizimning ichki energiyasining o'zgarishiga* ($\Delta U = U_2 - U_1$) *va tashqi ishning bajarilishiga* (L^*) *aylanadi*

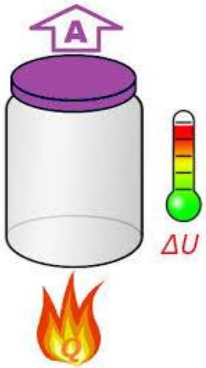
$$U_2 = U_1 + Q^*_{1,2} - L^*_{1,2}, \qquad (4.1)$$

yoki

$$Q_{1,2}^* = U_2 - U_1 + L^*_{1,2}. \qquad (4.2)$$

(4.1) tenglama differensial ko'rinishda quyidagicha yoziladi:

$$\delta Q^* = dU + \delta L^*. \qquad (4.3)$$



4.1-rasm. Ichki energiyaning o'zgarishi

(4.1; 4.2 va 4.3) tenglamalar issiqlik va ishning tashqi balansi bo'yicha termodinamikaning birinchi asosining matematik ifodalanishi bo'lib hisoblanadi.

Termodinamikada termodinamikaning birinchi asosining tenglamalarida ish va issiqlikni aniqlashda quyidagi belgilar qabul qilingan: agar ish jism tomonidan bajarilsa, u holda u musbat (+) belgiga ega bo'ladi, agar ish jismga olib kelinsa, u holda u manfiy (-) belgiga ega bo'ladi. Agar issiqlik jismga berilsa, u holda u musbat (+) qiymatga ega bo'ladi, agar issiqlik jismdan olib ketilsa, u holda u manfiy (-) qiymatga ega bo'ladi.

Real jarayonlarda δL^* samarali ish δL qaytar termodinamik ish va δL^{**} ishning qaytmaydigan yo'qolishlarining farqiga teng bo'ladi

$$\delta L^{*} = \delta L - \delta L^{**}. \qquad (4.4)$$

Yo‘qotilgan ish (ishqalanishga, zarbalarga, girdoblanishga) ichki issiqlik almashinishining issiqligiga (δQ^{**}) aylanadi

$$\delta Q^{**} = \delta L^{**}. \qquad (4.5)$$

SHundan kelib chiqqan holda δQ jism tomonidan olingan to‘liq issiqlik miqdori δQ^{*} tashqaridan olib kelingan issiqlik va δQ^{**} ichki issiqlik almashinishi issiqligining yig‘indisiga teng

$$\delta Q = \delta Q^{*} + \delta Q^{**}. \qquad (4.6)$$

δL^{*} va δQ^{*} ning qiymatlarini (4.5) boshlang‘ich tenglamaga o‘rniga qo‘yish bilan quyidagini olamiz:

$$\delta Q = \delta Q^{*} + \delta Q^{**} = dU + \delta L; \qquad (4.7)$$

$$Q_{1,2} = Q^{*}_{1,2} + Q^{**}_{1,2} = U_2 - U_1 + L_{1,2}. \qquad (4.8)$$

(4.7 va 4.8) tenglamalar *ishchi jismning balansi bo‘yicha termodinamikaning birinchi asosining tenglamalari* deb ataladi, ya’ni jismdagi real jarayonlar uchun xarakterli bo‘ladi.

Qaytar jarayonlarda $\delta L^{**} = \delta Q^{**} = 0$ bo‘ladi va tashqi balans va ishchi jismning balansi bo‘yicha termodinamikaning birinchi asosining tenglamalari mos tushadi.

4.2. Oddiy jismlar uchun termodinamikaning birinchi asosi

Oddiy jismlar uchun, ya’ni ularning holati ikkita mustaqil o‘zgaruvchilar bilan belgilanadigan jismlar uchun termodinamik ishning kattaligi quyidagi ko‘rinishda yoziladi:

$$\delta L = pdV. \qquad (4.9)$$

Jism tomonidan olingan to‘liq issiqlik miqdori quyidagi

ko‘rinishda yoziladi:

$$\delta Q = dU + \delta L = dU + pdV \,, \qquad (4.10)$$

yoki

1 kg jism uchun $$\delta q = du + \delta l = du + pdv \,. \qquad (4.11)$$

YAxlit massalarning (suyuqliklar, bug‘lar, gazlar) ko‘chish jarayonlarini o‘rganishda ko‘rib chiqishga $\delta w = -vdp$ potensial (texnik) ish tushunchasi kiritiladi (1.7). pdv ni kiritish va uning o‘ng qismidan ayirish bilan (4.13) tenglamani qayta yozamiz

$$\delta w = -vdp + pdv - pdv = pdv - d(pv), \qquad (4.12)$$

bundan

$$\delta w = \delta l - d(pv), \text{ yoki } \delta l = \delta w + d(pv). \qquad (4.13)$$

δl ifodani (4.11) tenglamaga o‘rniga qo‘yish bilan

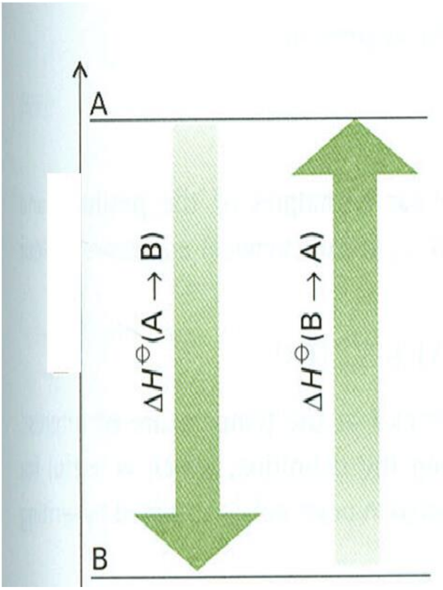
$$\delta q = du + \delta w + d(pv), \; \delta q = d(u + pv) + \delta w. \qquad (4.14)$$

ni olamiz.

$(u + pv)$ yig‘indi *h* bilan belgilanadi va *gazning entalpiyasi* deb ataladi.

Entalpiya fizikaviy ma’nosiga ko‘ra ichki energiya tushunchasiga qaraganda kichikroq qiymatga ega bo‘ladi, biroq o‘zida har xil muhandislik hisoblashlarini bajarish uchun qulay funksiyani taqdim qiladi. Entalpiya *u, p, v* holat parametrlari yordamida aniqlanishi sababli, u holatning funksiyasi bo‘lib hisoblanadi. To‘g‘ri va qaytar jarayonlar entalpiyasi bir-biriga teng lekin qarama-qarshi ishorali bo‘ladi (4.2-rasm):

$$\Delta N\ (A \rightarrow V) = -\ \Delta N\ (V \rightarrow A)$$



4.2-rasm. To‘g‘ri va qaytar jarayonlar entalpiyasi

Entalpiya holatning funksiyasi bo‘lgani sababli uni oddiy jism uchun har qanday ikkita parametrning, masalan p va T ning funksiyasi ko‘rinishida taqdim qilish mumkin. Holat funksiyasining differensiali to‘liq differensial bo‘lib hisoblanadi va shundan kelib chiqqan holda quyidagicha

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp \qquad (4.15)$$

yoziladi.

h entalpiya *J/kg* larda o‘lchanadi. Xuddi to‘liq ichki energiya kabi tizimning entalpiyasi ham *ekstensiv parametr* bo‘lib hisoblanadi, ya’ni $H = hG$.

Ishchi jismning balansi bo‘yicha termodinamikaning birinchi asosini quyidagi umumlashgan ko‘rinishda yozish mumkin:

$$\delta q = \delta q^{*} + \delta q^{**} = du + pdv = dh - vdp, \qquad (4.16)$$

yoki

$$q_{1,2} = q_{1,2}^{*} + q_{1,2}^{**} = u_2 + u_1 + \int_1^2 pdv = h_2 - h_1 - \int_1^2 vdp. \qquad (4.17)$$

Tashqi balans bo‘yicha termodinamikaning birinchi asosi quyidagicha yoziladi:

$$\delta q^{*} = du + \delta l^{*} = dh + \delta w^{*}, \qquad (4.18)$$

$$q_{1,2}^{*} = u_2 - u_1 + l_{1,2}^{*} = h_2 - h_1 + w_{1,2}^{*}. \qquad (4.19)$$

Real jarayonlarda samarali potensial (texnik) ish qaytar ish va ichki issiqlik almashinishining issiqligiga aylanadigan qaytmaydigan yo‘qolishlarning farqiga teng. SHu sababli:

$$W_{1,2}^{*} = W_{1,2} - W_{1,2}^{**}; \qquad W_{1,2}^{**} = Q_{1,2}^{**}; \qquad (4.20)$$

$$\delta W^{**} = \delta W - \delta W^{**}; \qquad \delta w^{**} = \delta q^{**} \qquad (4.21)$$

deb yozish mumkin.

Qaytar jarayonlarda tashqi balans bo‘yicha termodinamikaning birinchi asosining $\delta W^{**} = 0$ ifodasi ishchi jismning balansi bo‘yicha termodinamikaning birinchi asosining ifodasi bilan mos tushadi.

4.3. Termodinamikaning birinchi asosining analitik ifodasi

Ko‘rib chiqilayotgan jarayonda ($z = const$) modda miqdori birligiga olib kelingan yoki undan olib ketilgan issiqlik miqdorini moddaning issiqlik sig‘imi va haroratlar farqining ko‘paytmasi sifatida aniqlash mumkin

$$\delta q_z = \left(\delta q_z^{*} + \delta q_z^{**}\right) = c_z dt, \qquad (4.22)$$

$$q_{1,2} = \int_1^2 c_z dt = c_{zm}(t_2 - t_1), \qquad (4.23)$$

bu yerda c_z – moddaning haqiqiy issiqlik sig‘imi; c_{zm} – ko‘rib chiqilayotgan harorat oralig‘ida birinchi o‘rtacha issiqlik sig‘imi (harorat bo‘yicha chiziqli tarzda o‘rtachalashtirilgan).

Ikkita eng oddiy jarayonlarni ko‘rib chiqamiz:

$$z = v = idem,\ (dv = 0);\ \delta q_v = c_v dT = du_v;\ \ c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_v, \tag{4.24}$$

$$z = p = idem,\ (dp = 0);\ \ \delta q_p = c_p dt = dh_p; c_p = \left(\frac{\partial h}{dt}\right)_p. \tag{4.25}$$

Shunday qilib, o‘zgarmas bosim (c_p) va o‘zgarmas hajmda (c_v) haqiqiy issiqlik sig‘imlari mos keluvchi holat funksiyalari – entalpiya va ichki energiyaning harorat bo‘yicha xususiy hosilalari bo‘lib hisoblanadi. SHundan kelib chiqqan holda ularning o‘zlari ham holatning funksiyalari bo‘lib hisoblanadi.

Uning holati ikkita mustaqil o‘zgaruvchi bilan belgilanadigan oddiy jism uchun quyidagini yozish mumkin:

$$c_p = c_p(T, p) \tag{4.26}$$

$$c_v = c_v(T, p) \tag{4.27}$$

Ravshanki, (4.26) va (4.27) tenglamalarni hisobga olish bilan ichki energiya va entalpiyaning to‘liq differensiallari uchun ifodalar quyidagi ko‘rinishni oladi:

$$du = c_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv; \tag{4.28}$$

$$dh = c_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp. \tag{4.29}$$

$$\delta q = c_v dT + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + p\right] dv = c_p dT + \left[\left(\frac{dh}{dp}\right)_T - v\right] dp, \tag{4.30}$$

yoki

$$\delta q = \delta q^* + \delta q^{**} = c_v dt + h_v dv = c_p dt + h_p dp, \tag{4.31}$$

bu yerda h_v va h_p - kalorik koeffitsiyentlar – izotermik jarayonda ($t = const$) issiqlik sig‘imining analoglari

$$h_v = \left(\frac{\delta q_t}{dv}\right) = \left(\frac{\partial u}{dv}\right)_t + p = p - c_v D_u. \tag{4.32}$$

$$h_p = \left(\frac{\delta q_t}{dp}\right) = \left(\frac{\partial h}{dv}\right)_t - v = -\left[v + c_p D_h\right], \qquad (4.33)$$

bu yerda D_u va D_h – Joul-Gey Lyusaak (D_u) va Joul-Tomson (D_h) koeffitsiyentlari

$$D_u = \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_u \quad ; \quad D_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h . \qquad (4.34)$$

(4.30) va (4.31) tenglamalar o‘zida oddiy jismlar uchun termodinamikaning birinchi asosining analitik ifodalarini taqdim qiladi va ulardan termodinamikaning asosiy differensial tenglamalarini chiqarishda foydalaniladi.

4.4. Ideal gazlar uchun termodinamikaning birinchi asosi

Ideal gazlar ta’riflanishi bo‘yicha $pv = RT$ Klapeyron holat tenglamasiga va $u = u(T)$ yoki $\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = 0$ Joul qonuniga bo‘ysunadi.

Shu sababli (4.36) tenglamadan quyidagi kelib chiqadi:

$$du = c_v dT , \qquad (4.35)$$

$$u_2 - u_1 = c_{vm}\left(T_2 - T_1\right). \qquad (4.36)$$

Ideal gazlar uchun entalpiya xuddi ichki energiya kabi faqatgina gazning haroratiga bog‘liq bo‘lishini hisobga oladigan bo‘lsak, $h = h(T);\ \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = 0$ da quyidagiga ega bo‘lamiz:

$$dh = c_p dT \quad ; \qquad h_2 - h_1 = c_{pm}(T_2 - T_1). \qquad (4.37)$$

(4.31) ifodaga muvofiq ideal gaz uchun termodinamikaning birinchi asosining tenglamasi quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$\delta q = \delta q^* + \delta q^{**} = c_v dT + pdv = c_p dT - vdp \qquad (4.38)$$

yoki

$$q_{1,2} = c_{vm}\left(T_2 - T_1\right) + l_{1,2} = c_{hm}\left(T_2 - T_1\right) + w_{1,2}. \qquad (4.39)$$

(4.38) tenglamadan ideal gaz uchun quyidagini yozish mumkin:

$$(c_p - c_v)dT = pdv + vdp = d(pv) = RdT . \qquad (4.40)$$

Bundan bevosita shu kelib chiqadiki, o‘zgarmas bosim va doimiy hajmda ideal gazning haqiqiy issiqlik sig‘imlarining farqi gazning tavsifiy doimiysining kattaligiga teng bo‘ladi:

$$(c_p - c_v) = R. \quad (4.41)$$

(4.41) tenglamani bir kmol gaz uchun ham yozish mumkin

$$\bar{c}_{pm} - \bar{c}_{vm} = \mu(c_p - c_v) = \mu R = \bar{R}. \quad (4.42)$$

(4.38) tenglamani T mutlaq haroratga bo‘lish bilan quyidagini olamiz

$$\frac{\delta q}{T} = c_v \frac{dT}{T} + \frac{p}{T} dv = c_p \frac{dT}{T} - \frac{v}{T} dp. \quad (4.43)$$

Ideal gaz uchun $\frac{p}{T} = \frac{R}{v}$ va $\frac{v}{T} = \frac{R}{p}$ ekanligini hisobga olish bilan quyidagini olamiz:

$$\frac{\delta q}{T} = c_v(T)\frac{dT}{T} + R\frac{dv}{v} = c_p(T)\frac{dT}{T} - R\frac{dp}{p}. \quad (4.44)$$

(4.44) tenglamani ko‘rib chiqishdan ko‘rinadiki, uning o‘ng qismi to‘liq differensiallarning yig‘indisi ko‘rinishiga keltirilgan. Bu $\delta q / T$ nisbat ideal gazning holatining qanday bir funksiyasining to‘liq differensiali (s) ekanligini anglatadi, u *entropiya* deb ataladi.

Entropiyaning to‘liq differensiali

$$ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{\delta q^* + \delta q^{**}}{T}. \quad (4.45)$$

(4.44) tenglamadan integrallashdan keyin quyidagini olamiz:

$$S_2 - S_1 = c_{mv} \ln\frac{T_2}{T_1} + R\ln\frac{v_2}{v_1} = c_{mp} \ln\frac{T_2}{T_1} + R\ln\frac{p_1}{p_2}. \quad (4.46)$$

c_{mp} va c_{mv} issiqlik sig‘imlari ikkinchi o‘rtacha issiqlik sig‘imlari deb ataladi va mutlaq haroratlarni logarifm bo‘yicha o‘rtachalashtirish yo‘li bilan topiladi

$$c_{mz} = \frac{1}{\ln T_2 - \ln T_1} \int_1^2 c_z d\ln T. \quad (4.47)$$

Agar haqiqiy issiqlik sig‘imi $c_z = a_z + b_z T$ haroratning chiziqli funksiyasi bo‘lib hisoblanadi deb qabul qilsak, u holda quyidagicha yoziladi:

$$c_{mz} = \frac{\int_1^2 (a_z + b_z T)\frac{dT}{T}}{\ln\frac{T_2}{T_1}} = a_z + b_z \frac{T_2 - T_1}{\ln\frac{T_2}{T_1}} = a_z + b_z T_{mz}. \quad (4.48)$$

Bu shuni anglatadiki, agar birinchi o‘rtacha issiqlik sig‘imi (T_{ma}) o‘rtacha arifmetik haroratda haqiqiy issiqlik sig‘imiga teng bo‘lsa,

ikkinchi o‘rtacha issiqlik sig‘imi esa – (T_{mz}) o‘rtacha logarifmik haroratda haqiqiy issiqlik sig‘imiga teng bo‘lsa, u holda birinchi o‘rtacha issiqlik sig‘imi son jihatidan ikkinchi o‘rtacha issiqlik sig‘imiga qaraganda biroz katta bo‘ladi. Odatdagi muhandislik hisoblashlarini bajarishda bu issiqlik sig‘imlarini son jihatidan o‘zaro teng deb hisoblash mumkin.

Masalalar

25. Kengayish jarayonida 1 kg kislorodga 262 kJ issiqlik keltirilayapti. Agar uning harorati jarayon natijasida 95 ^{0}C pasaysa, gazning bajargan ishi nimaga teng. Issiqlik sig‘imining haroratga bogliqligini hisobga olmang.

Javob: ℓ=200 kJ/kg .

Echish:

1. Kislorod uchun (ikki atomli gaz)

μc_v=20,93 kJ/kmolK

$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu_{O_2}} = \frac{20,93}{32}$ =0,654 kJ/kgK

$\Delta u = c_v \cdot \Delta t = 0,654 \cdot 95 = 62$ kJ/kg

q-Δu=262-62=200 kJ/kg.

26. Elektr stantsiyasining qozonxonasida 20 soat ishlashda 28900 kJ/kg kaloriyali 62 tonna ko'mir yoqildi. Agar ko'mir yonishidan olingan issiqlikning 18% elektr energiyasiga aylangan bo'lsa, stantsiyaning o'rtacha quvvatini aniqlang,.

27. 4200 kVt quvvatli bug' elektr stantsiyasining samaradorligi 20%. Agar uning kaloriyali qiymati 25000 kJ bo'lsa, soatlik yoqilg'i sarfini aniqlang.

28. 1 kg havoning t_1 = 300 ^{0}C boshlang'ich holatidan t_2 = 50^{0}C da oxirgi holatiga o'tishidagi ichki energiyasining o'zgarishini toping. Issiqlik sig'imining haroratga bog'liqligi chiziqli deb qabul qilinadi.

29. Gaz kengayishining adiabatik jarayonidagi o'ziga xos texnik ishlarni aniqlang. Kengayganda gaz harorati 300 dan 100 ^{0}C gacha pasayadi, gaz tezligi 30 dan 10 m/s gacha kamayadi. Tashqi potentsial energiya holati o'zgarmaydi. Gazning o'rtacha issiqlik quvvati 1,3 kJ / kgK.

30. 5000 m^3 /soat havoga harorati 20 dan 120 ^0C gacha ko'tarilishi uchun qancha issiqlik etkazib berish kerak. tashqi kinetik va potentsial energiyalari holati doimiy deb qabul qilinadi.

Nazorat savollari

1. Termodinamikaning birinchi asosini ta’rifini keltiring.
2. Ishchi jismning balansi bo‘yicha termodinamikaning birinchi asosining tenglamalarini yozib bering.
3. Entalpiya to‘g‘risida tushuncha bering.
4. Entropiya to‘g‘risida tushuncha bering.
5. Termodinamik tizim bajargan ishni ko‘rib chiqing?
6. Kengayish ishini tushuntiring.

5. Termodinamik tizimlarning holatining o‘zgarish jarayonlari

5.1. Termodinamik jarayonlarning tasnifi

Oddiy jismlarning holatining o‘zgarish jarayonlarini tadqiq qilishda holatning o‘zgarish jarayonlarini ishning «bosim – solishtirma hajm» universal koordinatalarida tasvirlash asosiy qiziqish uyg‘otadi.

Termodinamik jarayonning tenglamasi yoki jarayonni p-*v* koordinatalarda tasvirlash ko‘rinishida grafik usul bilan, yoki $\varphi(p,v)=0$ analitik ko‘rinishda berilishi mumkin.

Jarayonning tenglamasi shuningdek bu jarayonda qandaydir bir holat funksiyasining qiymati o‘zgarmasligi to‘g‘risidagi boshlang‘ich shart bilan ($z = const; z = p, v, t, u, h, s$) yoki termodinamik jarayonning qandaydir bir hodisasining nolga tengligi to‘g‘risidagi shart bilan ($\delta q = 0$) ham berilishi mumkin, biroq bu holda boshlang‘ich shart jarayonning tenglamasining asosiy ko‘rinishiga keltiriladi.

Termodinamik jarayonlarni o‘rganishda, qoidaga ko‘ra, quyidagilar aniqlanadi:

1) ishchi jismning holat parametrlarining o‘zgarishi, bu jarayonning tenglamasini chiqarish yoki uni *P-v*, *P-T*, *T-s* va hokazo diagrammalarda grafik tarzda tasvirlash bilan bog‘lanadi;

2) jarayonning boshlang‘ich va oxirgi nuqtalarida tizimning holat parametrlari;

3) jarayonda ish va issiqlik almashinishining sonli qiymatlari;

4) ishchi jismning ichki energiyasi, entalpiyasi va entropiyasi qiymatlarining o‘zgarishi.

Eng muhim termodinamik jarayonlarning tavsiflari 5.1- jadvalda keltirilgan.

5.2. Eng oddiy termodinamik jarayonlar

Eng oddiy termodinamik jarayonlar deb odatda izobarik, izoxorik va izopotensial jarayonlarga aytiladi.

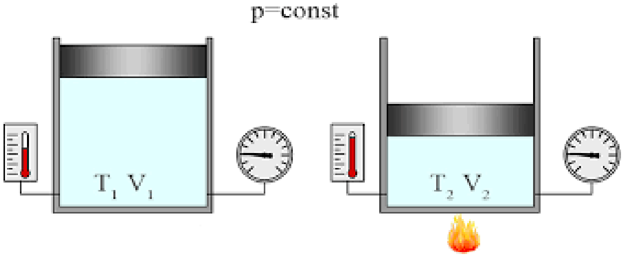
Izobarik jarayon ($p = const; dp = 0$) – unda tizimda bosim o‘zgarmasdan qoladigan jarayondir.

Izobarik jarayon (yoki izobara) grafik tarzda 5.2-rasmda keltirilgan.

Izobarik jarayonlarda solishtirma hajmning ortishi (1-2) yoki

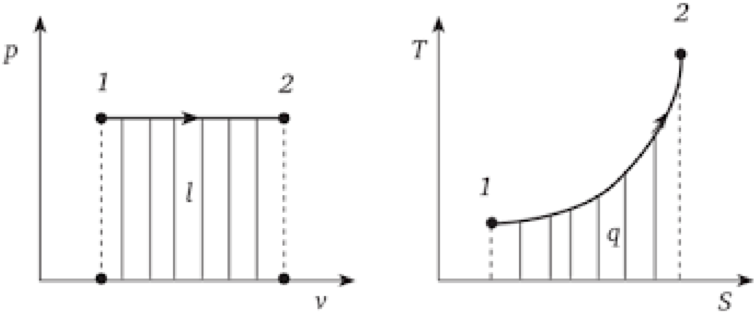
kamayishi (1-3) sodir bo‘ladi, bu haroratning mos ravishda o‘zgarishi – issiqlik olib kelinishi yoki olib ketilishi bilan bog‘lanadi.

Issiqlikning olib kelinishi yoki olib ketilishi izobarik jarayonlari porshenli ichki yonuvdvigatellari, gaz-turbinali dvigatellar, bug‘-kuch dvigatellari, sovutish qurilmalari va boshqalarda sodir bo‘ladi.



a) b)

5.1-rasm. Izobarik jarayonda ishchi jismning boshlang‘ich (a) va oxirgi holati



a) b)

5.2-rasm. Izobarik jarayonni *p-v* (a) va *T-s* (b) diagrammalarda ko‘rinishi

Ideal gaz uchun 1-2 izobarik jarayonda haroratning o‘zgarishi solishtirma hajmning o‘zgarishiga to‘g‘ri proporsional bo‘ladi: $\frac{T_2}{T_1} = \frac{v_2}{v_1}$.

Izobarik jarayonda ($p_1 = p_2 = p$) solishtirma termodinamik va potensial ishlar:

$$l_{1,2} = \int_1^2 p\,dv = p(v_2 - v_1) \qquad (5.1)$$

$$w_{1,2} = -\int_1^2 v\,dp = 0. \qquad (5.2)$$

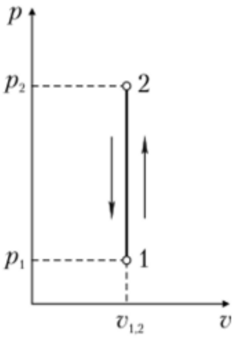
Izobarik jarayonda ishchi jismga olib kelinadigan (undan olib ketiladigan) issiqlik miqdori termodinamikaning birinchi asosining ifodasidan aniqlanadi

$$q_{1,2} = \Delta u + l_{1,2} = \Delta h = h_2 - h_1. \qquad (5.3)$$

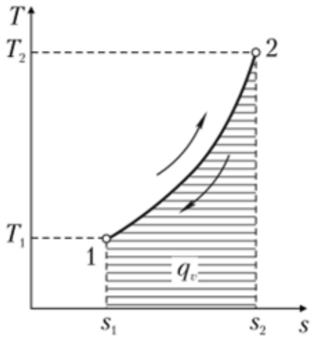
Izoxorik jarayon (v=const; dv=0) – tizimning hajmi yoki ishchi jismning solishtirma hajmi o‘zgarmasdan qoladigan jarayondir (5.3-rasm).

Izoxorik jarayonlarda bosimning ortishi (1-4) yoki kamayishi (1-5) sodir bo‘ladi, bu haroratning mos ravishda o‘zgarishi – issiqlik olib kelinishi yoki olib ketilishi bilan bog‘lanadi.

Issiqlikning olib kelinishi yoki olib ketilishi izoxorik jarayonlari porshenli ichki yonuv dvigatellari, gaz-turbinali dvigatellar, bug‘-kuch qurilmalari va boshqalarda sodir bo‘ladi.



a)



b)

5.3-rasm. Izoxorik jarayonni *p-v* (a) va *T-s* (b) diagrammalarda ko‘rinishi

Ideal gaz uchun izoxorik jarayonda 1-4 haroratning o‘zgarishi bosimning o‘zgarishiga to‘g‘ri proporsional bo‘ladi: $\frac{T_2}{T_1}=\frac{p_2}{p_1}$.

Izoxorik jarayonda (v_1 = v_4 = v) solishtirma termodinamik va potensial ishlar:

$$l_{1,4}=\int_1^4 p\,dv=0, \tag{5.4}$$

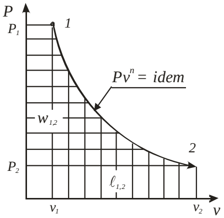
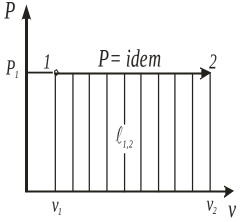
$$w_{1,4}=-\int_1^4 v\,dp=v(p_1-p_4). \tag{5.5}$$

Izoxorik jarayonda ishchi jismga olib kelinadigan (undan olib ketiladigan) issiqlik miqdori termodinamikaning birinchi asosining ifodasidan aniqlanadi

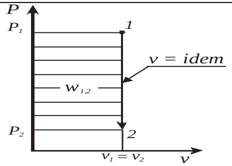
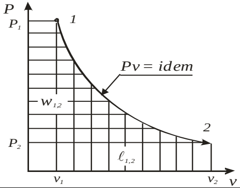
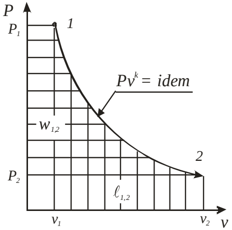
$$q_{1,2}=\Delta h+w_{1,2}=\Delta u=u_2-u_1. \tag{5.6}$$

5.1- jadval

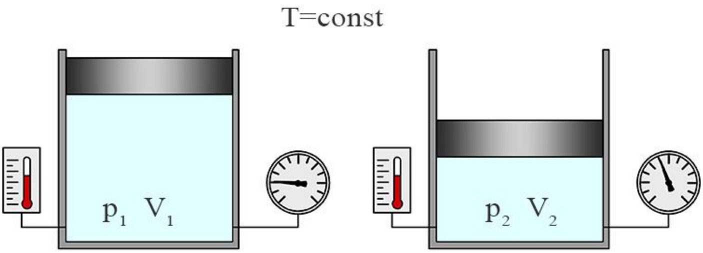
Oddiy jismning holatining o‘zgarishining termodinamik jarayonlari.

Jarayonning nomi va tenglamasi	Politrop ko‘rsatkichi	Grafik tasvirlanish	Ish	Issiqlik
1	2	3	4	5
Politrop $pv^n = const$	$-\infty \le n \le +\infty$, $n = -\frac{vdp}{pdv} = \frac{\delta w}{\delta \ell} =$ $= \frac{w_{1,2}}{\ell_{1,2}} = \frac{\log \frac{P_1}{P_2}}{\log \frac{v_2}{v_1}}$		$\ell_{1,2} = \frac{P_1 v_1}{n-1}\left(1-\tau_{1,2}\right)$, $w_{1,2} = n\frac{P_1 v_1}{n-1}\left(1-\tau_{1,2}\right)$, $\tau_{1,2} = \frac{P_2 v_2}{P_1 v_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} =$ $= \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1} = \frac{T_2}{T_1}$	$q_{1,2} = \Delta u_{1,2} + \ell_{1,2} =$ $= \Delta h_{1,2} + w_{1,2}$, $q_{1,2} = \frac{k-n}{k-n_u}\ell_{1,2}$
Izobarik $p = const$, $dp = 0$	$n = 0$		$\ell_{1,2} = p(v_2 - v_1)$, $w_{1,2} = 0$, $\tau_{1,2} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1} = \frac{T_2}{T_1}$	$q_{1,2} = \Delta u_{1,2} + \ell_{1,2} =$ $= \Delta h_{1,2}$

5.1- jadvalning davomi

1	2	3	4	5
Izoxorik $v = const,$ $dv = 0$	$n = \pm\infty$		$\ell_{1,2} = 0,$ $w_{1,2} = v(p_1 - p_2),$ $\tau_{1,2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \frac{T_2}{T_1}$	$q_{1,2} = \Delta u_{1,2} =$ $= \Delta h_{1,2} + w_{1,2}$
Izotermik $Pv = const,$	$n = 1$		$\ell_{1,2} = w_{1,2} =$ $= pv\,ln\frac{v_2}{v_1} = pv\,ln\frac{P_1}{P_2},$ $\tau_{1,2} = 1$	$q_{1,2} = \Delta u_{1,2} + \ell_{1,2} =$ $= \Delta h_{1,2} + w_{1,2},$
Adiabatik $\delta q = 0,$ $pv^k = const$	$n = k = n_s =$ $= -\left(\frac{vdp}{pdv}\right)_s = \left(\frac{\partial h}{\partial u}\right)_s$		$\ell_{1,2} = \frac{p_1 v_1}{\kappa - 1}\left(1 - \tau_{1,2}\right),$ $w_{1,2} = k\frac{p_1 v_1}{\kappa - 1}\left(1 - \tau_{1,2}\right),$ $\tau_{1,2} = \frac{P_2 v_2}{P_1 v_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} =$ $= \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} = \frac{T_2}{T_1}$	$q_{1,2} = 0$

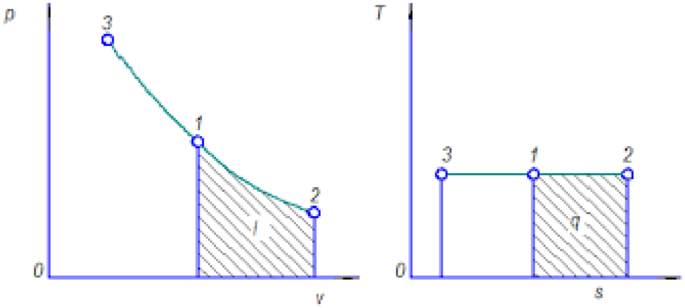
Izotermik jarayon – tizim holatining o‘zgarishida *(P=rv=const; d(rv)=0)* funksiya o‘zgarmas qiymatni saqlab qoladigan termodinamik jarayon.



a) b)

5.4-rasm. Izotermik jarayonda ishchi jismning boshlang‘ich (a) va oxirgi holati

Ideal gaz uchun, *pv=RT=const* bo‘lganligi sababli, u *izotermik jarayon* ham bo‘lib hisoblanadi.



a) b)

5.5-rasm. Izotermik jarayonning *p-v* (a) va *T-s* (b) diagrammalarda ko‘rinishi

Izopotensial jarayonda ($p_1v_1=p_6 \cdot v_6=pv$) solishtirma termodinamik va potensial ishlar:

$$l_{1,6} = \int_1^6 p\,dv = \int_1^6 pv\frac{dv}{v} = pvl_n\frac{v_6}{v_1}, \qquad (5.7)$$

$$w_{1,6} = -\int_1^6 v\,dp = -\int_1^6 vp\frac{dp}{p} = pv\int_6^1 \frac{dp}{p} = pv\ln\frac{p_1}{p_6}. \qquad (5.8)$$

($pv=const$) potensial funksiyaning doimiyligi, $\frac{p_1}{p_6} = \frac{v_6}{v_1}$ shartga amal qilinishi

sababli (5.7) va (5.8) ifodalarda logarifmlarning tengligiga olib kelishini ko‘rish qiyin emas. SHu sababli, izopotensial jarayonda termodinamik va potensial ishlarning sonli qiymatlari o‘zaro teng bo‘ladi.

Izopotensial jarayonda ishchi jismga olib kelinadigan (undan olib ketiladigan) issiqlik miqdori ishchi jismning balansi bo‘yicha termodinamikaning birinchi asosining ifodasidan aniqlanadi

$$q_{1,2} = \Delta u + l_{1,2} = \Delta h + w_{1,2} \qquad (5.9)$$

Eng oddiy termodinamik jarayonlar o‘zida politrop jarayonlarning xususiy holatlarini taqdim qiladi.

5.3. Politrop jarayonlar

“Politrop” atamasi o‘zida ikkita yunoncha so‘z: «poli» - ko‘p va «tropos» – yo‘l, yo‘nalish so‘zlarining birikuvini taqdim qiladi. SHu sababli politrop jarayonda tizimning holat parametrlarining turlicha o‘zgarishlari ko‘zda tutiladi.

Doimiy ko‘rsatkichli politrop jarayon deb oddiy jismning holatining o‘zgarishining quyidagi tenglamaga bo‘ysunadigan qaytar termodinamik jarayoniga aytiladi:

$$pv^n = const = C,\ p^{1/n}v = const = C_1, \qquad (5.10)$$

yoki

$$p_1v_1^n = p_2v_2^n, \qquad (5.10a)$$

bu yerda p – politrop ko‘rsatkichi, ko‘rib chiqilayotgan jarayonda doimiy kattalik bo‘lib hisoblanadi, biroq har qanday musbat va manfiy qiymatlarga ega bo‘lishi mumkin: ($-\infty \le n \le +\infty$).

p politrop ko‘rsatkichining fizikaviy ma’nosi (5.10) ifodani differensiallashdan keyin ma’lum bo‘ladi:

$$v^n dp + nv^{n-1} p dv = 0, \qquad (5.11)$$

$$npdv = -vdp. \tag{5.11a}$$

bundan bevosita quyidagi kelib chiqadi:

$$n = -\frac{vdp}{pdv} = \frac{\delta w}{\delta \ell} = \frac{w_{1,2}}{\ell_{1,2}}, \tag{5.12}$$

bu doimiy politrop ko‘rsatkichi son jihatidan potensial ish va termodinamik ishning elementar yoki oxirgi qiymatlarining nisbatiga teng bo‘lishini anglatadi, bu qiymatlar «bosim – solishtirma hajm» koordinatalarida mos keluvchi maydonlarning kattaliklari bilan o‘lchanadi (5.6,a-rasm).

Logarifmik koordinatalarda (logarifmning asosi har qanday bo‘lishi mumkin) doimiy ko‘rsatkichli politrop o‘zida to‘g‘ri chiziqni taqdim qiladi, bunda politrop ko‘rsatkichi bu to‘g‘ri chiziqning egilish burchagining tangensiga teng bo‘ladi (5.6,b rasm):

$$log\,p + n\,log\,v = const = log\,C, \tag{5.13}$$

$$log\,p = log\,C - n\,log\,v. \tag{5.13a}$$

Oxirgi ifoda ($V = A - p \cdot X$) to‘g‘ri chiziq tenglamasiga teng, biroq faqatgina *log v- logp* logarifmik koordinatalar to‘rida teng bo‘ladi.

Shu asosda shunday deb tasdiqlash mumkinki, doimiy ko‘rsatkichli politrop logarifmik koordinatalar to‘rida (5.2,b-rasm) to‘g‘ri chiziq bilan tasvirlanadi.

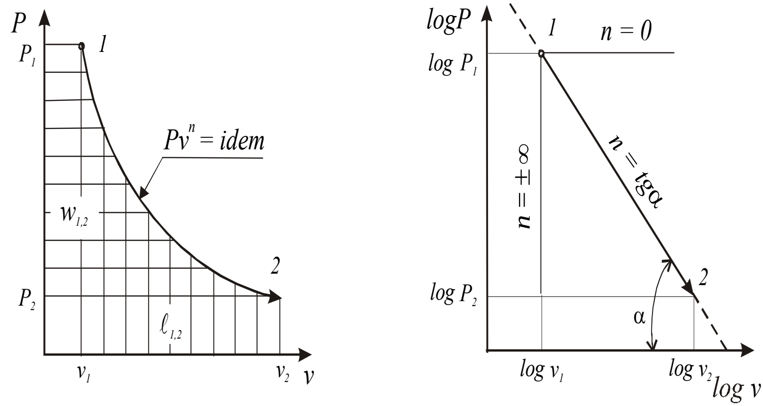
SHundan kelib chiqqan holda, politropning doimiy ko‘rsatkichi jarayonning chizig‘ining egilish burchagining tangensi sifatida aniqlanadi (5.6,b-rasm).

$$n = \frac{log\,p_1 - log\,p_2}{log\,v_2 - log\,v_1} = \frac{log(p_1/p_2)}{log(v_2/v_1)} \tag{5.14}$$

(5.14) tenglama jarayonning ko‘rsatkichining sonli qiymatini va jarayonning turini aniqlash imkonini beradi. (5.12) tenglamadan bevosita tarzda shu kelib chiqadiki, izobarik jarayon uchun $n = 0$ bo‘ladi; izoxorik jarayon uchun $n = \pm\infty$ bo‘ladi; izopotensial jarayon uchun $n = 1$ bo‘ladi (5.3-rasm).

Shuni qayd qilish lozimki, hamma termodinamik jarayonlar ham *logv – logp* koordinatalarda to‘g‘ri chiziq bilan tasvirlanavermaydi, ya’ni doimiy ko‘rsatkichli politrop tenglamasiga bo‘ysunmaydi. Biroq

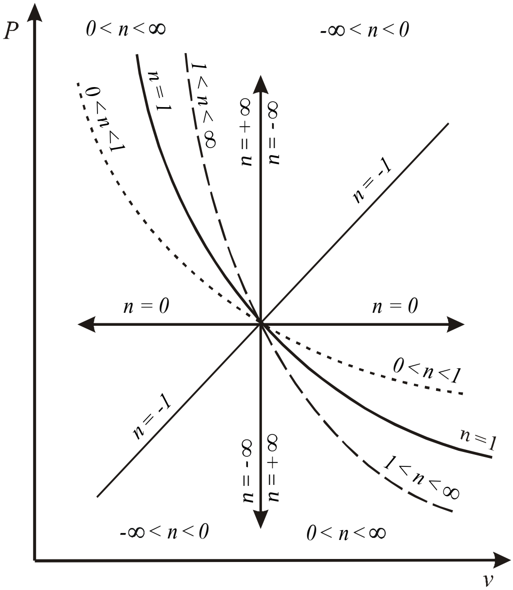
har qanday termodinamik jarayonni o‘zgaruvchan ko‘rsatkichli politrop tenglamasi bilan tasvirlash mumkin.



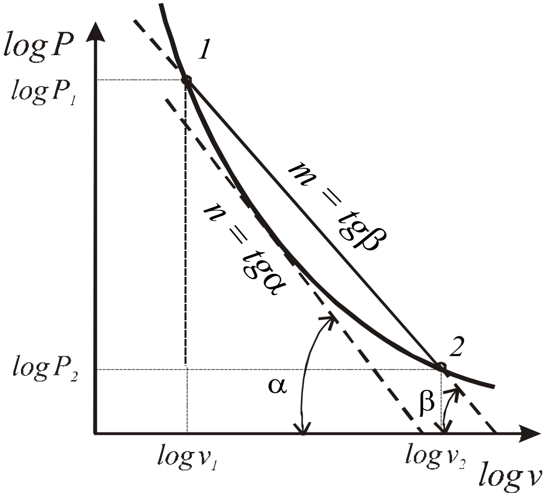
a) b)

5.6- rasm. Doimiy ko‘rsatkichli politropni P-v diagramma va logarifmik koordinatalarda ko‘rinishi

5.7-rasmda keltirilgan *o‘zgaruvchan ko‘rsatkichli politrop* jarayonning uchta ko‘rsatkichini – (*p*) jarayonning haqiqiy ko‘rsatkichi, $(\bar{n})$ birinchi o‘rtacha ko‘rsatkich va (*m*) ikkinchi o‘rtacha ko‘rsatkichni ko‘rib chiqishga kiritish imkonini beradi. Jarayonning haqiqiy ko‘rsatkichi (*n)* elementar potensial ishning (□*w*) elementar termodinamik ishga (□*ℓ*) nisbati sifatida aniqlanadi, bu logarifmik koordinatalar to‘rida urinma chiziqning egilish burchagining tangensiga mos keladi.



5.7-rasm. Oddiy jismning holatining o‘zgarishining politrop jarayonlari



5.8-rasm. O‘zgaruvchan ko‘rsatkichli politrop.

$$n = \frac{\delta w}{\delta \ell} = -\frac{vdP}{Pdv} = \frac{d\log P}{d\log v} = tg\alpha . \qquad (5.15)$$

Qandaydir bir funksiya yoki (*z* = *p, v, T, u, h, s,*) holat parametrining oʻzgarmas qiymati bilan tavsiflanadigan konkret jarayonlar uchun politropning haqiqiy koʻrsatkichi quyidagi nisbat bilan aniqlanadi

$$n_z = -\frac{v}{P}\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_z ; \qquad (5.15a)$$

Politropning oʻrtacha koʻrsatkichlaridan ($\bar{n}$, m) termodinamik jarayonning parametrlarining oxirgi koʻrsatkichlarini aniqlash uchun foydalaniladi.

Politropning birinchi oʻrtacha koʻrsatkichi jarayondagi potensial va termodinamik ishlarning oxirgi (integral) qiymatlarining nisbati sifatida aniqlanadi

$$\bar{n} = \frac{w_{1,2}}{\ell_{1,2}} . \qquad (5.16)$$

Politropning ikkinchi oʻrtacha koʻrsatkichi son jihatidan logarifmik koordinatalar toʻrida 1-2 kesuvchi chiziqning egilish burchagining tangensiga teng (5.8- rasm).

$$m = \frac{\log p_1 - \log p_2}{\log v_2 - \log v_1} = \frac{\log(p_1 / p_2)}{\log(v_2 / v_1)} . \qquad (5.17)$$

Oxirgi ifodadan bevosita tarzda oʻzgaruvchan koʻrsatkichli politrop tenglamasi kelib chiqadi

$$\frac{p_2}{p_1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^m = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{m}} \frac{v_2}{v_1} = 1 \quad , \qquad (5.18)$$

$$p_1 v_1^m = p_2 v_2^m . \qquad (5.18a)$$

Oʻzgaruvchan koʻrsatkichli politrop tenglamasi bilan har qanday termodinamik jarayonni tasvirlash mumkin deya tasdiqlash shu sababli ham adolatli boʻladiki, jarayonning oʻzining oʻzgaruvchan parametr-laridan tashqari, jarayonning oʻzining koʻrsatkichi ham oʻzgaruvchan boʻlib hisoblanadi (1 boshlangʻich nuqtaning koordinatalarining qiymatlari doimiy, jarayonning 2 nuqtasining koordinatalari oʻzgaruvchan boʻladi).

SHuni qayd qilish lozimki, muhandislik hisoblashlarini bajarishda jarayonning barcha keltirilgan koʻrsatkichlarining qiymatlari son jihatidan oʻzaro teng deb qabul qilinadi: ($n = m = \bar{n}$).

5.4. Oddiy jismlarning politrop jarayonlarida ish

Politrop jarayonlarda termodinamik va potensial ishlarning oxirgi (integral) kattaliklarining ifodalarini ularning elementar qiymatlarini taqqoslash bilan olish mumkin:

$$\delta l = pdv, \ldots \delta w = -vdp, \tag{5.19}$$

$$\delta l - \delta w = pdv + vdp = d(pv). \tag{5.20}$$

(5.15) politrop ko‘rsatkichini aniqlashni hisobga olish bilan quyidagiga ega bo‘lamiz:

$$\delta l - \delta w = (1-n)\delta l = d(pv), \tag{5.21}$$

$$\delta l = \frac{1}{1-n} d(pv). \tag{5.22}$$

Jarayon doimiy ko‘rsatkichli politrop tenglamasiga ($n=const$) bo‘ysunishini hisobga olgan holda oxirgi ifodani integrallash bilan termodinamik ish uchun integral tenglamani aniqlash uchun quyidagi tenglamani olamiz:

$$l_{1,2} = \int_1^2 \frac{1}{1-n} d(pv) = \frac{1}{1-n}\int_1^2 d(pv) = \frac{1}{1-n}(p_2v_2 - p_1v_1). \tag{5.23}$$

Kengayish yoki siqilish jarayonining tavsifi tushunchasini kiritamiz, u quyidagi nisbat bilan aniqlanadi:

$$\tau_{1,2} = \frac{p_2v_2}{p_1v_1}. \tag{5.24}$$

(5.24) nisbatni hisobga olish bilan termodinamik va potensial ishni aniqlash tenglamalari quyidagi ko‘rinishni qabul qiladi:

$$l_{1,2} = \frac{p_1v_1}{n-1}(1-\tau_{1,2}), \tag{5.25}$$

$$w_{1,2} = nl_{1,2} = \frac{n}{n-1} p_1v_1(1-\tau_{1,2}). \tag{5.26}$$

$\tau_{1,2}$ kengayish yoki siqilishning tavsifini aniqlash uchun turli tenglamalar (5.18) tenglamani hisobga olish bilan chiqariladi:

$$\frac{p_2}{p_1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^n = \frac{p_2v_2}{p_1v_1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n-1} = \tau_{1,2}\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n-1} = 1, \tag{5.27}$$

yoki

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}}\frac{v_2}{v_1}=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}-1}\frac{p_2v_2}{p_1v_1}=\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}\tau_{1,2}=1. \qquad (5.27a)$$

Shundan kelib chiqqan holda, kengayishning (siqilishning) tavsifini aniqlash uchun hisobiy ifodani yozish mumkin:

$$\tau_{1,2}=\frac{p_2v_2}{p_1v_1}=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}=\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}. \qquad (5.28)$$

5.5. Oddiy jismlardagi termodinamik jarayonlarda issiqlik almashinishi

Oddiy jismlarning holatining o‘zgarishining har qanday termodinamik jarayonida issiqlik almashinishini jarayonning termodinamik yoki potensial ishining kattaligiga bog‘liq ravishda ifodalash mumkin. Bunda termodinamik jarayonga umumiy holatda o‘zgaruvchan ko‘rsatkichli politrop sifatida qaraladi.

Oddiy jismlar uchun issiqlik almashinishining hisobiy ifodasi termodinamikaning birinchi asosining ifodasini ko‘rib chiqish asosida olinadi

$$\delta q=du+\delta l. \qquad (5.29)$$

Oddiy jismlar uchun solishtirma ichki energiyani har qanday ikkita mustaqil holat parametrlarining funksiyasi ko‘rinishida taqdim qilish mumkin. $u=i\ (p,\ v)$ deb qabul qilamiz. SHunda ichki energiyaning differensiali quyidagi ko‘rinishda yoziladi:

$$du=\left(\frac{\partial u}{dv}\right)_P dv+\left(\frac{\partial u}{dp}\right)_v dp. \qquad (5.30)$$

Oxirgi ifodani quyidagi ko‘rinishda taqdim qilish mumkin:

$$du=\frac{1}{p}\left(\frac{\partial u}{dv}\right)_P pdv+\frac{1}{v}\left(\frac{\partial u}{dP}\right)_v vdp. \qquad (5.31)$$

Quyidagi belgilashlarni kiritamiz:

$$a_v=\frac{1}{p}\left(\frac{\partial u}{dv}\right)_P, \qquad a_p=\frac{1}{v}\left(\frac{\partial u}{dp}\right)_v \qquad (5.32)$$

Bunda (5.30) ifoda quyidagi ko‘rinishni oladi:

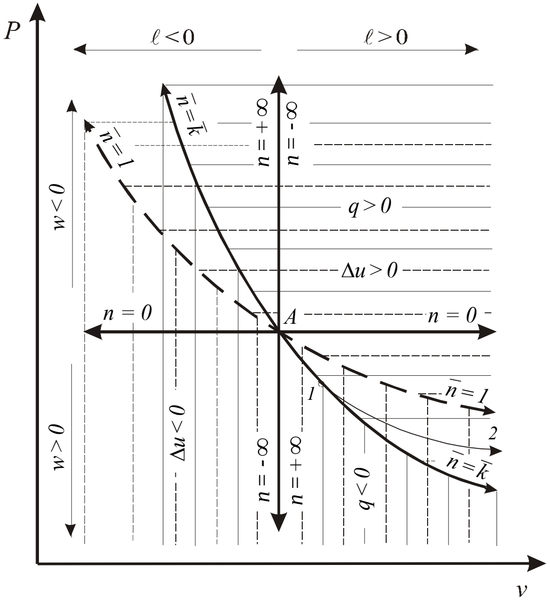
$$du=a_v\delta l-a_p\delta w=a_v\delta l-a_pn\delta l=\left(a_v-na_p\right)\delta l. \qquad (5.33)$$

(5.29), (5.31) va (5.33) nisbatlarni taqqoslash bilan quyidagini olamiz

$$\delta q = (a_v - na_p + 1)\delta l. \qquad (5.34)$$

(a_v va a_p) kattaliklarni aniqlash uchun ikkita termodinamik jarayonni ko‘rib chiqamiz:

1. Izoenergetik jarayon*:* *u=const, du=0*. Bu jarayon uchun politrop ko‘rsatkichi $n = n_u$ qiymatni qabul qiladi.



5.9-расм. Идеал газнинг ҳолатининг ўзгариш жараёнлари:

$q_{1,2} > 0$ |||| $q_{1,2} < 0$

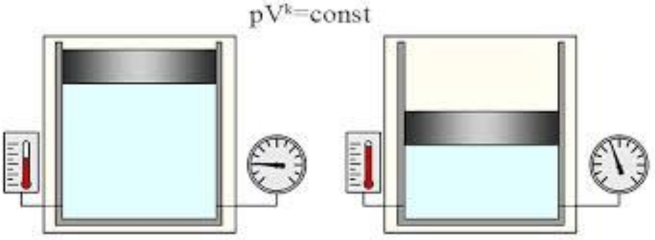
$\Delta u_{1,2} > 0$ |||| $\Delta u_{1,2} < 0$

Izoenergetik jarayonda $\delta\ell \neq 0$ ekanligi sababli (5.33) tenglamadan quyidagi kelib chiqadi

$$a_v - n_u a_p = 0, \qquad (5.35)$$

$$a_v = n_u a_p. \qquad (5.35a)$$

2. Adiabatik jarayon: $\delta\, q = 0$. Bu jarayonda politrop ko‘rsatkichi $n=k$ qiymatni qabul qiladi, u adiabata ko‘rsatkichi deb ataladi.



a) b)

5.10-rasm. Adiabatik jarayonda ishchi jismning boshlang‘ich (a) va oxirgi holati

Adiabatik jarayonda elementar termodinamik ish ham nolga teng bo‘lmaydi, shu sababli (5.34) ifodadan quyidagiga ega bo‘lamiz

$$a_v - ka_p + 1 = 0. \tag{5.36}$$

Oxirgi ikkita (5.35) va (5.36) nisbatlarni taqqoslaymiz

$$a_p = \frac{1}{k - n_u} \quad \text{va} \quad a_v = \frac{n_u}{k - n_u}. \tag{5.37}$$

a_V va a_P ning topilgan qiymatlarini hisobga olish bilan ichki energiya va issiqlik almashinishining elementar qiymatlari uchun ifodalarni topamiz:

$$du = \frac{n_u - n}{k - n_u}\delta\ell, \tag{5.38}$$

$$\delta q = \frac{k - n}{k - n_u}\delta\ell. \tag{5.39}$$

Integral ko‘rinishda oxirgi ikkita tenglama quyidagi ko‘rinishni qabul qiladi:

$$\Delta u = \frac{n_u - n}{k - n_u}\ell_{1,2}, \tag{5.40}$$

$$q_{1,2} = \frac{k - n}{k - n_u}\ell_{1,2}. \tag{5.41}$$

Keltirilgan nisbatlar *p-v* koordinatalarda issiqlikning olib kelinish va olib ketilish sohalarini qurish imkonini beradi (5.9-rasm).

5.6. Ideal gazning holatining o‘zgarish jarayonlari

Ideal gazlarning holatining o‘zgarish jarayonlarini o‘rganishda (5.30) – (5.40) umumiy nisbatlarga $p\ v\ =\ R\ T$ Klapeyron holat tenglamasi va $u=u(T)$ Joul tenglamasi qo‘shiladi. Mazkur qonunlar va entalpiyani aniqlashga muvofiq ideal gaz uchun quyidagiga ega bo‘lamiz:

$$T = const \text{ bo‘lganda } pv = const \qquad (5.42)$$

$$h = u + pv = u + RT = h(T); \qquad (5.43)$$

$$du = c_v dT; \qquad (5.44)$$

$$dh = c_p dT. \qquad (5.45)$$

(5.42)÷(5.45) tenglamalardan shu kelib chiqadiki, ideal gaz uchun izopotensial ($pv=const$), izotermik ($T=const$), izoenergetik ($u=const$) va izoentalыpik ($h = const$) jarayonlar teng bo‘ladi va shundan kelib chiqqan holda, bu jarayonlarning

$$n_{pv} = n_T = n_u = n_h = 1, \qquad (5.46)$$

ko‘rsatkichlari ham teng bo‘ladi.

Ideal gaz uchun Klapeyron qonunini hisobga olish bilan kengayish yoki siqilish jarayonlarining tavsifi

$$\tau_{1,2} = \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1} = \frac{T_2}{T_1}. \qquad (5.47)$$

Jarayonda ideal gaz uchun ichki energiya va entalpiyaning Joul qonuniga muvofiq o‘zgarishi:

$$\Delta u = c_{vm}(T_2 - T_1), \qquad (5.48)$$

$$\Delta h = c_{pm}(T_2 - T_1). \qquad (5.48a)$$

Ideal gaz uchun adiabatik jarayonning ko‘rsatkichi o‘zgarmas bosim va doimiy hajmda mos keluvchi issiqlik sig‘imlarining nisbati sifatida aniqlanadi

$$k = n_s = \left(\frac{\delta w}{\delta \ell}\right)_{\delta q=0} = \left(\frac{\partial h}{\partial u}\right)_{\delta q=0} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v} \qquad (5.49)$$

Mayer qonuni asosida ($\bar{c}_p - \bar{c}_v = \bar{R}$) ideal gaz uchun adiabata ko‘rsatkichi quyidagicha hisoblanadi

$$k = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v} = \frac{\bar{c}_v + \bar{R}}{\bar{c}_v} = 1 + \frac{\bar{R}}{\bar{c}_v} > 1 . \qquad (5.50)$$

Ideal gaz misolida termodinamik jarayonlarni tahlil qilishni amalga oshiramiz (5.5-rasm).

Ideal gaz uchun $n_u = 1$ bo‘ladi va bundan quyidagini yozish mumkin

$$\delta q = \frac{k - n}{r - 1}\delta l . \qquad (5.51)$$

Adiabata ($\delta q = 0$) (5.9-rasm) issiqlik almashinishining belgisining almashish chizig‘i bo‘lib hisoblanadi.

Gaz kengayganda termodinamik ish $\delta l > 0$ bo‘ladi va shunda adibatadan o‘ngroqda joylashgan ($n < k$) har qanday politrop issiqlikning olib kelinish sohasida joylashadi ($\delta q > 0$).

Agar kengayishning politropi adiabatadan chapda joylashsa ($n > k$), u holda bu jarayon issiqlikning olib ketilishi bilan tavsiflanadi ($\delta q < 0$).

SHunday qilib, adiabatadan yuqorida kechadigan barcha termodinamik jarayonlar issiqlik olib kelinishi yoki olib ketilishi bilan amalga oshadi.

Masalalar

29. Boshlang‘ich parametrlari 0,3 MPa, 15^0S va 0,8 m^3 bo‘lgan havoning bosimini doimiy hajmda to 0,1 MPa gacha kamaytirish uchun qanaqa haroratgacha sovitish kerak? Buning uchun qancha issiqlikni olib ketish kerak?

Havoning issiqlik sig‘imini doimiy deb hisoblang.

Javob: t_2 = - 177^0C; Q = - 329 kJ

Echish:

1. Holatning tenglamasidan havoning massasini topamiz:

$$M = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{0{,}3 \cdot 10^6 \cdot 0{,}8}{287 \cdot 288} = 2{,}9 \text{ kg.}$$

2. Oxirgi harorat

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad T_2 = \frac{P_2 T_2}{P_1} = \frac{0{,}1 - 288}{0{,}3} = 96K; \quad t_2 = -177^0C$$

3. Olib ketilishi kerak bo‘lgan issiqlik

$Q = MC_{vm}(t_2 - t_1)$ bu yerda

$$S_{vm} = \frac{\mu C_v}{\mu} = \frac{20{,}93}{28{,}95} = 0{,}722$$

$Q_v = 2{,}9 \cdot 0{,}722 \cdot 10^3(-177+15) = -329\ kJ$

30. YOpiq idishda harorati $t_1 = 10^0C$ va siyraklanishi P_1=20 mm sim.ust. bo‘lgan gaz joylashgan. Barometr 75 kPa ni ko‘rsatyapti. Gaz sovitilgandan keyin siyraklanish 150 mm sim.ust. ga teng bo‘lib qoldi. Gazning oxirgi haroratini toping.

Javob: $t_2 = -40,4^0C$.

31. Diametri 0,4 m silindrda, bosimi 0,29 MPa va harorati 15^0C bo‘lgan 80 l havo joylashgan. Havoning issiqlik sig‘imini doimiy deb hisoblangan holda, agar havoga 83,7 kJ issiqlik keltirilayotgan bo‘lsa, porshen joyiga siljimasdan qolishi uchun unga ta’sir qilayotgan kuchini qanchaga oshishini aniqlang.

Javob: P_2= 0,66 MPa; G=$85,5 \cdot 10^3 H$

32. Qozon qurilmasining tutun gazlari havo qizitgich orqali o‘tib ketyapti. Gazlarning boshlang‘ich harorati $t_{G1}=300^0S$, oxirgisi $t_{G2}=160^0C$, gazning sarfi 1000 kg/soat ga teng. Havoning boshlang‘ich harorati $t_{x1}=15^0C$ va sarfi 910 kg/soat.

Agar havo qizitgichning yo‘qotishi 4 % bo‘lsa, qizigan havoning haroratini toping. Qozondan chiqib ketayotgan tutun gazlarining va havoning o‘rtacha issiqlik sig‘imlarini (c_{rm}) tegishli ravishda 1,0467 va 1,0048 kJ/kgK larga teng deb qabul qiling.

Javob: $t_{x2}=168,9^0S$.

Nazorat savollari

1. Termodinamik jarayonlarida gaz holatini o‘zgarishi haqida nimalarni bilasiz?
2. «Termodinamik jarayonlarida gaz holatini o‘zgarish jarayonlarini tahlil qilish" tushunchasi deganda nimani tushunasiz?
3. Termodinamik jarayonlarida gaz holatining o‘zgarishini P-V, T-s diagrammalardagi ko‘rinishlarini tushuntiring.
4. Jarayonlarda ish va issiqlik ifodalari qanday yoziladi?

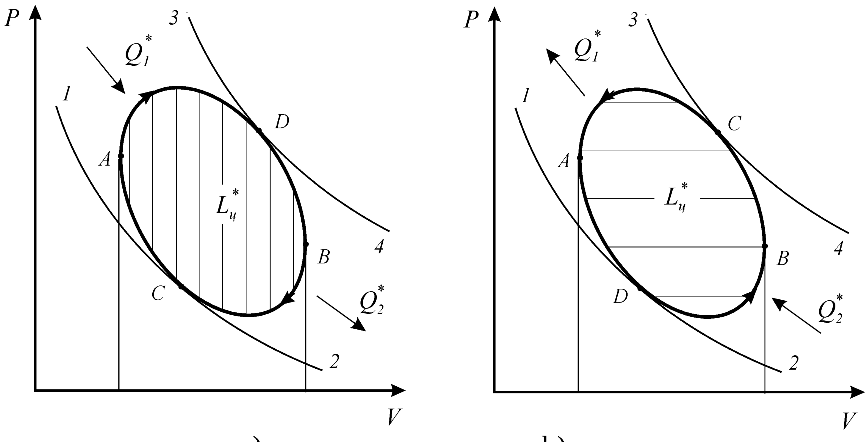
6. Aylanma jarayonlar (sikllar)

6.1. Issiqlik mashinalari

Termodinamikada *issiqlik mashinalari* deb issiqlik dvigatellari va sovutish mashinalariga aytiladi.

Issiqlik mashinalarining *aylanma jarayonlari* yoki *sikllari* deb tizimning (ishchi jismlarning) boshlang‘ich holatga qaytishi bilan tavsiflanadigan yopiq jarayonlarga aytiladi. Davriy ravishda takrorlanadigan aylanma jarayonlar issiqlik mashinalarida amalga oshadi.

To‘g‘ri (issiqlik dvigatellarining sikllari) va teskari (sovutish mashinalarining sikllari) aylanma jarayonlar farqlanadi (6.1-rasm).



a) b)

6.1-rasm. Issiqlik mashinalarining to‘g‘ri (*a*) va teskari (*b*) sikllari.

Aylanma jarayon natijasida tizim (ishchi jism) boshlang‘ich holatga qaytishi sababli, ya’ni barcha holat parametrlari boshlang‘ich holatga qaytishi sababli, tizimning har qanday holat funksiyasining integral o‘zgarishi nolga teng bo‘ladi

$$\oint dz = 0, \qquad (6.1)$$

bu yerda $z = P; \ V(v); \ T; \ U(i); \ H(h)$ va hokazolar.

Ularning natijasida foydali ish olinadigan aylanma jarayonlar issiqlik dvigatellarida amalga oshadi. Bunday sikllar to‘g‘ri sikllar deb

ataladi va p- V holat diagrammasida soat strelkasi bo‘yicha yo‘naladi (6.1,a-rasm).

Ularning natijasida ishchi jismlarning atrof muhitning haroratidan past haroratgacha sovushi sodir bo‘ladigan aylanma jarayonlar sovutish mashinalarida amalga oshadi. Bunday sikllar teskari sikllar deb ataladi va soat strelkasiga teskari yo‘naladi (6.1,b-rasm).

Sikl uchun tashqi balans bo‘yicha termodinamikaning birinchi asosining ifodasi quyidagi ko‘rinishda yoziladi:

$$\oint \delta Q^* = \oint dU + \oint \delta L^* . \qquad (6.2)$$

SHu munosabat bilan $\oint dU = 0$ sikl uchun quyidagini olamiz:

$$\oint \delta Q^* = \oint \delta L^* \qquad (6.2a)$$

bu - siklning ishi tashqi muhit bilan issiqlik almashinish hisobiga amalga oshishini anglatadi. Real dvigatellarning aylanma jarayoni alohida oxirgi elementlar – ishchi jismning qizishi, kengayishi, siqilishi va undan issiqlikning olib ketilishidan tashkil topadi. Har qanday siklda jarayonlar issiqlik olib kelinishi bilan ham, olib ketilishi bilan ham sodir bo‘ladi. Agar siklning grafigiga *1-2* va *3-4* urinma adiabatalar qo‘shilsa (6.1-rasm), u holda, 5.9-rasmga muvofiq, adiabatadan o‘ngroqda kechadigan jarayonlarda issiqlik ishchi jismga olib kelinadi. 6.1-rasmda issiqlikning olib kelinishi to‘g‘ri *C-A-D* va teskari *D-B-C* sikllarda sodir bo‘ladi. Adiabatadan chaproqda kechadigan jarayonlarga issiqlikning olib ketilishi hamrohlik qiladi. Bu mos ravishda 6.1,a va 6.1,b-rasmlarda *D-B-C* va *C-A-D* jarayonlarga to‘g‘ri keladi.

Siklda issiqlik olib kelinishi va olib ketilishi jarayonlari, ishchi jismning kengayishi va siqilishi amalga oshishini hisobga olish bilan issiqlikning yakuniy o‘zgarishi ($\oint \delta Q^*$) va ishning yakuniy o‘zgarishi ($\oint \delta L^*$) quyidagi ko‘rinishda yoziladi:

$$\oint \delta Q^* = |Q_1^*| - |Q_2^*| \qquad (6.3)$$

$$\oint \delta L^* = |L_ц^*| = |L_{расш}^*| = |L_{сж}^*| \qquad (6.4)$$

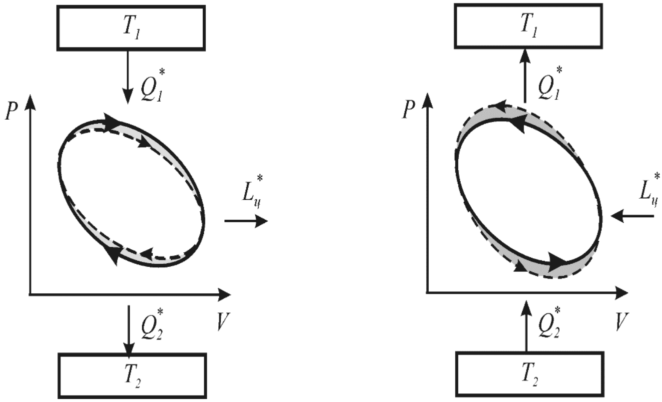
Oxirgi nisbatlardan quyidagi kelib chiqadi:

$$|Q_1^*| - |Q_2^*| = |L_ц^*| , \qquad (6.5)$$

bundan ularda issiqlikning ishga aylanish jarayoni amalga oshadigan issiqlik dvigatellarining sikllari uchun ($L_ц^* > 0$) ishchi jismga

olib kelingan issiqlik miqdori olib ketilgan issiqlik miqdoridan katta bo‘lishi kelib chiqadi: $|Q_1^*| > |Q_2^*|$. Sovutish mashinalarining sikllarida siklning ishi manfiy bo‘ladi ($L_ц^* < 0$) va ishchi jism olganiga qaraganda ko‘proq issiqlikni beradi: $Q_1^*| < |Q_2^*|$.

Real dvigatellarning ishchi jarayonining diagrammasi (6.2, a-rasm) va sovutish mashinalarining ishchi jarayonining diagrammasi (6.2,b-rasm) qaytar sikllardan farq qiladi, bu avvalambor ishchi jism va tashqi issiqlik manbalarining haroratlarida farqlar bo‘lishi bilan bog‘lanadi: issiqlik dvigatelining ishchi jarayonining diagrammasi tashqi manbalarning haroratlarining chegaralarining ichida joylashadi, sovutish mashinasining diagrammasi esa – tashqi manbalarning haroratlarining chegaralaridan tashqarida joylashadi.



a) b)

6.2-rasm. Issiqlik dvigateli (a) va sovutish mashinasining (b) termodinamik chizmalari: qaytar sikl, real sikl.

Qaytar issiqlik mashinalarining (issiqlik dvigatellari va sovutish mashinalari) ishchi jarayonlarining diagrammalari mutlaqo bir xil bo‘ladi, biroq qarama-qarshi yo‘naladi: bunday holda tashqi manbalar va ishchi jismning haroratlari mos tushadi, ichki issiqlik almashinishi esa bo‘lmaydi.

Aylanma jarayonlar barcha issiqlik va sovutish mashinalarining asosi bo‘lib hisoblanadi.

Har qanday real issiqlik dvigatelining samaradorligi foydali ish koeffitsiyenti (FIK) bilan belgilanadi. FIK son jihatidan olingan ishning tashqaridan olib kelingan issiqlik miqdoriga nisbatiga teng bo‘ladi:

$$\eta = \frac{L_{ц}^{*}}{Q_{1}^{*}} . \tag{6.6}$$

(6.5) nisbatni hisobga olish bilan (6.6) foydali ish koeffitsiyentining ifodasi quyidagi ko‘rinishga keltiriladi:

$$\eta = \frac{\left|Q_{1}^{*}\right| - \left|Q_{2}^{*}\right|}{\left|Q_{1}^{*}\right|} = 1 - \frac{\left|Q_{2}^{*}\right|}{\left|Q_{1}^{*}\right|} . \tag{6.6a}$$

Issiqlik dvigatelining qaytar sikli uchun termik FIK quyidagicha aniqlanadi

$$\eta_{qaytar} = \frac{L_{ц.обр}}{Q_{1обр}} . \tag{6.7}$$

Issiqlik dvigatelining termodinamik siklining termik foydali ish koeffitsiyenti:

$$\eta_{t} = \frac{L_{ц}}{Q_{1}} = \frac{\left|Q_{1}\right| - \left|Q_{2}\right|}{\left|Q_{1}\right|} = 1 - \frac{\left|Q_{2}\right|}{\left|Q_{1}\right|} . \tag{6.8}$$

Termik FIK u yoki bu siklning mukammallik darajasini tavsiflaydi: (η_t) kattalik qanchalik katta bo‘lsa, xuddi o‘sha bir xil olib kelingan issiqlik miqdorida shunchalik ko‘p ish bajariladi.

Sovutish mashinalarining sikllarining samaradorligi (χ) sovutish koeffitsiyenti bilan baholanadi. Sovutish koeffitsiyenti son jihatidan sovuq manbadan olib ketilgan issiqlik miqdorining sarflangan ishga nisbatiga teng bo‘ladi.

Real sovutish mashinasi uchun sovutish koeffitsiyenti quyidagi nisbat bilan baholanadi

$$\chi = \frac{\left|Q_{2}^{*}\right|}{\left|L_{ц}^{*}\right|} . \tag{6.9}$$

Sovutish mashinasining qaytar sikli uchun – quyidagi nisbat bilan baholanadi

$$\chi_{qay} = \frac{\left|Q_{2обр}\right|}{\left|L_{ц.обр}\right|} . \tag{6.10}$$

Sovutish mashinasining real sikli uchun – quyidagi nisbat bilan baholanadi

$$\chi_t = \frac{|Q_2|}{|L_ц|}. \qquad (6.11)$$

Ideal issiqlik dvigateli va sovutish mashinasi siklning ishining, olib kelingan va olib ketilgan issiqlikning mutlaq qiymatlarining tengligiga amal qilish bilan mexanik tarzda tutashtirilganda siklning qaytarligining matematik shartini olish mumkin

$$\chi_{обр} = \frac{|Q_{2обр}|}{|L_{ц.обр}|} = \frac{|Q_{1обр}| - |L_{ц.обр}|}{|L_{ц.обр}|} = \frac{|Q_{1обр}|}{|L_{ц.обр}|} - 1 = \frac{1}{\eta_{обр}} - 1 \qquad (6.12)$$

yoki

$$\eta_{обр} = (\chi_{обр} + 1) = 1. \qquad (6.12a)$$

Issiqlik mashinalari nazariyasining asosini Karno qaytar sikli tashkil qiladi.

6.2. Karno sikli

Fransuz muhandisi Sadi Karno 1824 yilda issiqlik mashinasining ikkita adiabata va ikkita izotermadan tashkil topgan, ikkita T_1 va T_2 doimiy haroratli tashqi manbalar o‘rtasida ideal gaz bilan amalga oshadigan qaytar siklini taklif qilgan.

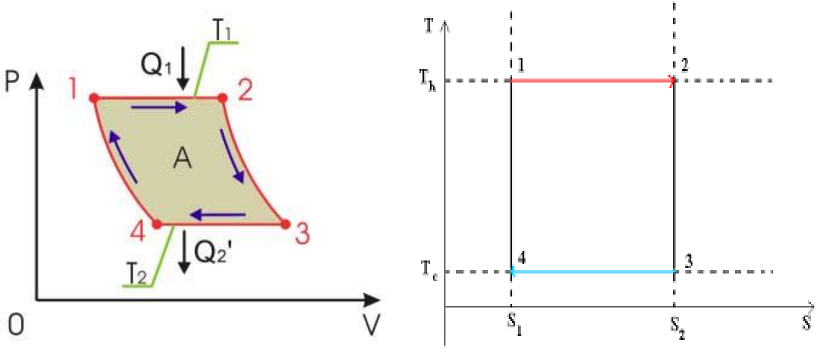
Issiqlik dvigateli uchun Karno sikli 6.3-rasmda tasvirlangan.

Issiq manbadan issiqlikni olib kelish *A-V* izotermada T_1 haroratda amalga oshiriladi, bunda ishchi jism – ideal gaz kengayadi va foydali ish olinadi (6.3,a-rasm). Keyinchalik *V-S* adiabata bo‘yicha T_2 haroratgacha kengayishda ham foydali ish olinadi. Keyingi jarayonlar – sovuq manbaga issiqlikni olib ketish bilan T_2 izoterma bo‘yicha *C-D* siqish va (T_1) boshlang‘ich haroratgacha *D-A* adiabatik siqishni amalga oshirish uchun ham ma’lum bir ish sarflanadi.

Siklda ideal gazdan foydalanilishi sababli – uning uchun ilgari entropiyaning mavjud bo‘lishi tamoyili aniqlangan edi – bu siklni “*T-S*” koordinatalarda ham tasvirlash mumkin (6.3,b-rasm).

Karno siklida Q_1 olib kelinadigan va Q_2 olib ketiladigan issiqlik miqdori:

$$\delta Q = TdS. \qquad (6.13)$$



a) b)

6.3-rasm. Issiqlik dvigateli uchun Karno siklining P-v (a) va T-s (b) diagrammalarda ko‘rinishi

Grafik jihatdan Karno sikli "*T-S*" koordinatalarda o‘zida to‘g‘ri to‘rtburchakni taqdim qiladi, chunki bu yerda izotermalar va adiabatalar to‘g‘ri chiziqlar bilan tasvirlanadi.

Qaytar siklda olib kelingan va olib ketilgan issiqlikning integral miqdori quyidagi nisbatlar bilan aniqlanadi:

$$|Q_1| = \int_A^B T_1 \cdot dS \; = \; T_1 \int_A^B dS \; = T_1(S_b - S_a), \tag{6.14}$$

$$|Q_1| = \int_D^C T_2 \cdot dS \; = \; T_2 \int_D^C dS \; = \; T_2(S_C - S_D). \tag{6.15}$$

Sikl yopilishi uchun siklda entropiyaning yakuniy o‘zgarishi (holatning funksiyasi sifatida) nolga teng bo‘lishi zarur

$$\oint dS = 0\,. \tag{6.16}$$

SHundan kelib chiqqan holda

$$S_B - S_A = S_C - S_D = S_2 - S_1 = \Delta S\,. \tag{6.17}$$

Olib kelingan va olib ketilgan issiqlik miqdori quyidagi nisbatlar bilan aniqlanadi:

$$|Q_1| = T_1 \Delta S\,, \tag{6.18}$$

$$|Q_2| = T_2 \Delta S\,, \tag{6.19}$$

Siklning ishi

$$\left|L_ц\right| = \left|Q_1\right| - \left|Q_2\right| = (T_1 - T_2)\Delta S\,. \qquad (6.20)$$

(6.8) ifodani siklning FIK ni aniqlashga muvofiq va olib kelingan issiqlik va olingan ishning musbat belgilarini hisobga olish bilan Karno siklining foydali ish koeffitsiyentining ifodasini quyidagi ko‘rinishda taqdim qilish mumkin

$$\eta_t^K = \frac{L_ц}{Q_1} = \frac{(T_1 - T_2)\Delta S}{T_1 \Delta S} = 1 - \frac{T_2}{T_1}\,. \qquad (6.21)$$

Shundan kelib chiqqan holda, sovutish mashinasi uchun Karno teskari siklining sovutish koeffitsiyenti quyidagi nisbat bilan aniqlanadi:

$$\chi_t^K = \frac{T_2}{T_1 - T_2}\,. \qquad (1.22)$$

Olingan (6.21) va (6.22) nisbatlar shundan guvohlik beradiki, Karno qaytar siklining FIK va sovutish koeffitsiyenti faqatgina T_1 issiq va T_2 sovuq issiqlik manbalarining mutlaq haroratlarining nisbatiga bog‘liq bo‘ladi. (6.21) nisbatni tahlil qilish shuni ko‘rsatadiki, issiq va sovuq manbalarning haroratlarining farqi ortishi bilan Karno siklining foydali ish koeffitsiyenti ortadi. Umuman olganda FIK ikkita holatda - $T_1 \to \propto$ va $T_2 \to 0$ da birga qarab intiladi. Har ikkala variantni ham amalga oshirib bo‘lmaydi, shu sababli dvigatellarda mumkin qadar katta haroratlar farqiga ega bo‘lish zarur bo‘ladi.

Karno sikli issiqlik texnikasi uchun katta ahamiyatga ega. U T_1 va T_2 haroratlar o‘rtasida ishlaydigan issiqlik dvigatelining termodinamik FIK ning eng yuqori mumkin bo‘lgan qiymatini aniqlash imkonini beradi. Bunda u go‘yo real mavjud dvigatellarning FIK ni taqqoslash mumkin bo‘lgan etalon bo‘lib hisoblanadi va amaliyotda real dvigatellarning foydali ish koeffitsiyentini shu qiymatga yaqinlashtirishga harakat qilinadi.

Masalalar

32. Yopiq idishda vakuum bosim p = 6667 Pa va t_1 = 70 ^{0}C haroratli gaz mavjud. Barometr ko'rsatkichlari - 101325 Pa.

Vakuum bosimni p_2 = 13332 Pa ga aylanishi uchun gazni qanday haroratgacha sovutish kerak?

33. Sig'imi $V = 0,6\ m^3$ bo'lgan yopiq idishda $p_1 = 0,5$ MPa bosim va $t_1 = 20$ °C haroratda havo bor. Idishning sovishi natijasida undagi havo 105 kJ issiqlik yo'qotadi.

Havoning doimiy issiqlik sig'imini o‘zgarmas deb hisoblab, idishda qanday bosim va qanday harorat o'rnatilishini aniqlang.

34. 2 m^3 havoni doimiy yuqori bosim $p = 0,2$ MPa va $t_1 = 100\ ^0C$ dan $t_2 = 500\ ^0C$ da qizdirish uchun qancha issiqlik sarflanishi kerak. Havo qanday ishni bajaradi? Atmosfera bosimi $p_{bar} = 101325$ Pa.

35. Tsilindrda $P = 0,5$ MPa bosim va $t_1 = 400\ ^0C$ haroratda havo bor. Issiqlik doimiy bosim ostida havodan chiqariladi, jarayon oxirida harorat $t_2 = 0\ ^0C$ ga teng bo‘ladi. Havo joylashgan tsilindrning hajmi 400 litrni tashkil qiladi.

Issiqlik miqdori, ichki energiyaning o'zgarishi va bajarilgan siqilish ishini aniqlang. Issiqlik quvvati 1,3289 kJ/ (m^3K) ga teng.

36. 1 kg havo $t_1 = 30\ ^0C$ haroratda va boshlang'ich bosimi $P_1 = 0,1$ MPa da izotermik ravishda oxirgi bosim $P_2 = 1$ MPa ga siqiladi.

Oxirgi hajmni, sarf qilingan ishni va gazdan chiqarilgan issiqlik miqdorini aniqlang.

37.1 kg havo $t_1 = 30$ °C va $P_1 = 0,1$ MPa bosimda adiabatik tarzda $P_2 = 1$ MPa oxirgi bosimigacha siqiladi.

Oxirgi hajmni, oxirgi haroratni va sarflangan ishni aniqlang.

38. Gaz dvigatelida gaz va havo aralashmasi adiabatik tarzda siqiladi, shuning uchun siqilish oxirigacha uning harorati gazning o'z-o'zidan yonish haroratidan 200 °C past bo'ladi. Siqilish boshida $P_1 = 0,9$ MPa va $t_1 = 70\ ^0C$ ga teng. Adiabatik ko'rsatkich $k = 1,36$, $R = 314$ J / (kgK), o'z-o'zidan yonish harorati 650 °C.

Siqilish ishining miqdori va siqilish darajasini $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ aniqlang.

38. 1 kg havo $P_1 = 0,5$ MPa va $t_1 = 111\ ^0C$ da politropik tarzda $P_2 = 0,1$ MPa bosimgacha kengayadi.

Agar politropa ko‘rsatkichi m=1,2 bo'lsa, havoning oxirgi holatini, ichki energiyaning o'zgarishini, berilgan issiqlik miqdori va qabul qilingan ishni aniqlang.

39. 1,5 kg havo polipropik tarzda $P_1 = 0,09$ MPa va $t_1 = 18\ ^0C$ dan $P_2 = 1$ MPa gacha siqiladi; harorat $t_2 = 125\ ^0C$ gacha ko'tariladi.

Politropik ko‘rsatkichini, oxirgi hajmni, sarflangan ishni va chiqarilgan issiqlik miqdorini aniqlang.

Nazorat savollari

1. Aylanma jarayon to‘g‘risida tushuncha bering.
2. To‘g‘ri va teskari jarayonlar to‘g‘risida tushuncha bering.
3. Karno siklini qaysi jarayonlardan tashkil etgan?
4. Karno siklining foydali ish koeffitsiyenti qanday aniqlanadi?

7. Termodinamikaning ikkinchi asosi

Yuqorida qayd qilib o‘tilganidek, termodinamikaning birinchi asosi o‘zida energiyaning saqlanish va aylanish qonunining matematik ifodalanishini taqdim qiladi. Termodinamikaning birinchi asosi har qanday jarayonning energetik balansini tuzish imkonini beradi, biroq berilgan jarayonning yo‘naltirilganligi bo‘yicha hech qanday ko‘rsatmalarni bermaydi. Jarayonlarning amalga oshishi va kechish yo‘nalishi shartlari termodinamikaning ikkinchi asosi asosida aniqlanadi.

Termodinamikaning birinchi va ikkinchi asosi birgalikda issiqlik mashinalari nazariyasi va umuman texnik termodinamikani qurishda fundament bo‘lib hisoblanadi.

Odatda klassik termodinamikaning ikkinchi asosi jismlar va murakkab tizimlarning entropiya deb ataluvchi qandaydir bir holat funksiyasining mavjud bo‘lishi va o‘sib borishining birlashgan tamoyili sifatida talqin qilinadi (entropiya atamasi R. Klauzius tomonidan taklif qilingan: en – ichkariga, ichiga va trope yoki tropos – qaratilish, yo‘l, umuman olganda - ichkariga qaratilish, energiyani qadrsizlantirish chorasi).

Muvozanatli tizimlarda entropiyaning mavjud bo‘lishi tamoyili uning termodinamik xususiyatlarini (bosim, zichlik va hokazolar) tavsiflaydi, izolyasiyalangan tizimlarning entropiyasining ortib borish tamoyili esa tizimda real jarayonlarning kechishining ko‘proq ehtimolli yo‘nalishini ko‘rsatadi.

Entropiyaning differensiali to‘liq differensial bo‘lib hisoblanadi (*dS),* u qaytar jarayonlarda tashqaridan olib kelingan issiqlikning $\delta Q^{\bullet}_{обр.}$ elementar miqdorining *T* mutlaq haroratga nisbati sifatida aniqlanadi (qaytar jarayonlarda ichki issiqlik almashinishi bo‘lmaydi, $\delta Q^{\bullet\bullet} = O$).

$$dS = \frac{\delta Q^{\bullet}_{обр.}}{T} \tag{7.1}$$

Entropiyaning ortib borish tamoyili – bu izolyasiyalangan tizimlarda entropiyaning o‘zgarmasdan ortib borishi to‘g‘risida termodinamikaning ikkinchi asosining tasdig‘idir

$$dS_{изол.} > O \tag{7.2}$$

Shuni qayd qilish lozimki, entropiyaning mavjud bo‘lishi va ortib borishi o‘zaro hech qanday umumiylikka ega emas. Entropiyaning ortib borishi tamoyili faqatgina real jarayonlarning kechishining ko‘proq ehtimolli yo‘nalishini tavsiflaydi va shundan kelib chiqqan

holda, entropiyaning mavjud bo‘lishi tamoyiliga qaraganda shubhasiz kamroq umumiylikka ega. SHu asosda prof. N.I. Belokon 1954 yilda bu tamoyillarni alohida-alohida ko‘rib chiqishni va ular uchun matematik ifodalarni turli postulatlar asosida olishni adolatli tarzda taklif qilgan.

Entropiya va mutlaq haroratning har qanday jismlarning holatining termodinamik funksiyalari sifatida mavjud bo‘lishi to‘g‘risidagi xulosa termodinamikaning ikkinchi asosining (professor N.I. Belokonning aytishicha – termostatikaning ikkinchi asosining) asosiy mazmunini tashkil qiladi.

$\delta Q = \delta Q^{\bullet} + \delta Q^{\bullet\bullet} = TdS$ tenglik ko‘rinishidagi matematik ifodani har qanday jarayonlarga – qaytar va qaytmas jarayonlarga nisbatan qo‘llash mumkin. Bu qonunni chiqarishda postulat sifatida *«harorat jismlar o‘rtasidagi o‘z-o‘zidan issiqlik almashinishining yo‘nalishini belgilaydigan birdan-bir holat funksiyasidir»* deya tasdiqlashdan foydalaniladi.

Entropiyaning mavjud bo‘lish tamoyilining matematik ifodasini jismlar o‘rtasida keltirilgan issiqlik almashinishini tavsiflaydigan elementar issiqlik miqdorining ($\delta Q = \delta Q^{\bullet} + \delta Q^{\bullet\bullet}$) tizimning T mutlaq haroratiga nisbati ko‘rinishida yozamiz

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = \frac{\delta Q^{*} + \delta Q^{**}}{T}. \qquad (7.3)$$

1 kg modda uchun

$$ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{\delta q^{*} + \delta q^{**}}{T}. \qquad (7.3a)$$

Shuningdek shuni ham qayd qilish lozimki, (7.3) va (7.3a) tenglamalarga kiradigan T mutlaq harorat kattaligi termodinamikaning ikkinchi asosining analitik ifodalanishida katta rol o‘ynaydi. Haqiqatan ham, termodinamikaning ikkinchi asosidan chiqarilgan har qanday termodinamik tenglama T harorat bilan tizimning boshqa parametrlari o‘rtasidagi u yoki bu bog‘lanishni ifodalaydi.

Mutlaq harorat T va entropiya S tushunchalarini bog‘laydigan (7.3) va (7.3a) tenglamalarning borligi T-S entropiya diagrammalarini qurish uchun asosni beradi, ulardan issiqlik almashinishi bilan bog‘lanadigan barcha jarayonlarni tahlil qilishda samarali foydalaniladi.

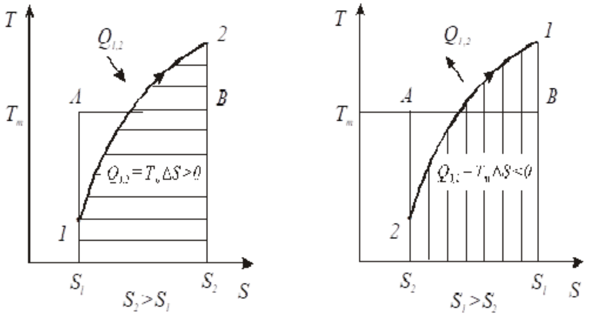
Entropiya diagrammalari deb ularda koordinata o‘qlaridan biriga S entropiyaning qiymati, boshqasiga – boshqa har qanday holat parametri, masalan, T mutlaq harorat yoki h solishtirma entalpiya

qo‘yiladigan har qanday diagrammalarni hisoblash qabul qilingan. Mos ravishda bu diagrammalar *T- S*; *h – S* diagrammalar deb ataladi.

T–S diagrammaning ahamiyati, masalan, avvalambor jismga beriladigan yoki undan olib ketiladigan issiqlik miqdorini grafik tarzda tasvirlash imkoniyatidan iborat. Termodinamik issiqlik almashinishini tavsiflaydigan issiqlik miqdori *T- S* koordinatalarda jarayonning 1-2 chiziqlari (1 va 2 nuqtalar orqali o‘tkazilgan ordinatalar) bilan *S* o‘q o‘rtasidagi maydon bilan o‘lchanadi (7.1-rasm).

Issiqlik almashinishining belgisi jismning entropiyasining o‘zgarish yo‘nalishi bilan belgilanadi. Agar jarayon entropiyaning ortib borishi tomonga ($dS > O$), ya’ni *T- S* koordinatalarda chapdan o‘ngga qarab borsa, u holda u jismga issiqlikning olib kelinishi ($\delta Q > O$) bilan tavsiflanadi (7.1,a-rasm). Agar jarayon o‘ngdan chapga, ya’ni entropiyaning kamayish tomoniga ($dS < O$) qarab borsa, u holda u jismdan issiqlikning olib ketilishi bilan tavsiflanadi ($\delta Q < O$) (7.1,b-rasm).

$$Q_{1,2} = \int_1^2 T \cdot dS = T_m \int_1^2 dS = T_m (S_2 - S_1) . \tag{7.4}$$



a) b)

7.1-rasm. Termodinamik jarayonlarda issiqlik olib kelinishi (a) va issiqlikning olib ketilishi (b)

Oxirgi ifoda son jihatidan *T-S* koordinatalardagi jarayonning 1-2 egri chizig‘i ostidagi maydonga teng (7.1-rasm).

T–S koordinatalarda issiqlik almashinishining umumiy ifodalari termodinamik ishning $\delta L = pdV$ umumiy ifodalariga o‘xshash, farq faqatgina shundan iboratki, issiqlik bilan ta’sir ko‘rsatishda kuch rolini

T mutlaq harorat, deformatsion koordinata rolini esa – S entropiya o‘ynaydi. SHu asosda T-S koordinatalar har qanday jismlar va jismlar tizimlari uchun issiqlik almashinishining universal koordinatalari bo‘lib hisoblanadi.

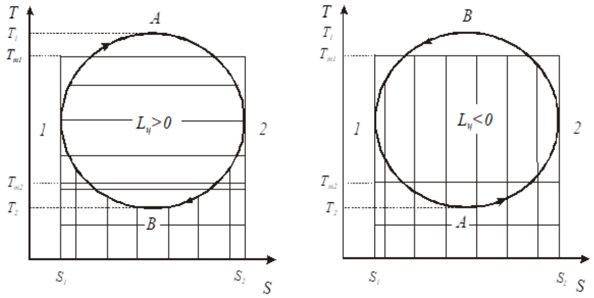
T-S diagrammalarda izotermik va adiabatik jarayonlar to‘g‘ri chiziqlar ko‘rinishida tasvirlanadi. Izotermik jarayon S abssissalar o‘qiga parallel tarzda, muvozanatli adiabatik jarayon esa – ordinatalar o‘qiga parallel tarzda boradi, chunki izoentropik jarayon deb ataluvchi bu jarayonda $S = const$ bo‘ladi.

Issiqlik mashinalarining ixtiyoriy sikllarining yopilishi (7.2,a-rasm) va sovutish mashinalarining ixtiyoriy sikllarining yopilishi (7.2,b-rasm) T-S koordinatalarda issiqlikning berilish jarayonida ishchi jismning entropiyasining ΔS_1 ortishi son jihatidan issiqlikning olib ketilish jarayonida entropiyaning ΔS_2 kamayishiga teng degan shart bilan belgilanadi:

$$|\Delta S_1| = |\Delta S_2|. \qquad (7.5)$$

*1A*2 jarayonda issiqlik ishchi jismga olib kelinadi. Olib kelinadigan issiqlik miqdori diagrammada gorizontal shtrixlangan maydonga mos keladi. Vertikal shtrixlangan maydon *2V1* jarayonda ishchi jismdan olib ketilgan issiqlik miqdoriga mos keladi.

Issiqlikning olib kelinish va olib ketilish jarayonlarida ishchi jismning o‘rtacha haroratlarini mos ravishda T_{m1} va T_{m2} bilan belgilaymiz. SHunda (7.4) ifodaga muvofiq issiqlik miqdorini aniqlash uchun ifodalarni quyidagi ko‘rinishda yozish mumkin:



a) b)

7.2-rasm. T-S koordinatalarda to‘g‘ri (a) va teskari (b) sikllar.

$$|Q_1| = \int_1^2 T \cdot dS = T_{m1}(S_2 - S_1) = T_{m1}|\Delta S_{1,2}|, \qquad (7.6)$$

$$\left|Q_2\right| = \int_1^2 T \cdot dS = T_{m2}\left(S_2 - S_1\right) = T_{m2}\left|\Delta S_{1,2}\right|. \qquad (7.8)$$

Oxirgi nisbatlarni hisobga olish bilan issiqlik mashinasining har qanday termodinamik siklining foydali ish koeffitsiyenti va sovutish koeffitsiyenti mos ravishda quyidagicha aniqlanadi:

$$\eta_t = 1 - \frac{\left|Q_2\right|}{\left|Q_1\right|} = 1 - \frac{T_{m2} \cdot \left|\Delta S_{1,2}\right|}{T_{m1} \cdot \left|\Delta S_{1,2}\right|} = 1 - \frac{T_{m2}}{T_{m1}}, \qquad (7.9)$$

$$\chi_t = \frac{\left|Q_2\right|}{\left|Q_1\right| - \left|Q_2\right|} = \frac{T_{m2} \cdot \left|\Delta S_{1,2}\right|}{(T_{m1} - T_{m2}) \cdot \left|\Delta S_{1,2}\right|} = \frac{T_{m2}}{T_{m1} - T_{m2}}. \qquad (7.10)$$

Olingan ifodalar shundan guvohlik beradiki, issiqlik mashinalarining foydali ish koeffitsiyenti va sovutish koeffitsiyenti issiqlikni olib kelish va olib ketish jarayonlarida faqatgina ishchi jismning o‘rtacha mutlaq haroratlari bilan belgilanadi.

(7.9) va (7.10) tenglamalardan shuningdek issiqlik mashinalarining har qanday termodinamik sikli uchun quyidagi shart bajarilishi kelib chiqadi

$$\eta_t\left(\chi_t + 1\right) = 1. \qquad (7.11)$$

Agar issiqlikning olib kelinish va olib ketilish jarayonlarida harorat o‘zgarmasdan qolsa, ishchi jismning kengayish va siqilish jarayonlari esa adibatik bo‘lsa, u holda har qanday sikl Karno sikliga aylanadi.

Har qanday termodinamik siklning termik FIK (7.9) va ishchi jismning xuddi o‘sha T_1 va T_2 eng chekka haroratlari o‘rtasida kechadigan Karno siklining FIK ni (6.21) taqqoslashdan quyidagi kelib chiqadi

$$\eta_t^K > \eta_t. \qquad (7.12)$$

Sovutish koeffitsiyentlarini taqqoslashda ham quyidagi analitik xulosaga kelish mumkin:

$$\chi_t^K > \chi_t. \qquad (7.13)$$

Real jarayonlarda entropiyaning o‘zgarishining yo‘nalishini aniqlashning asosiga, ya’ni entropiyaning ortib borishi tamoyilining asosiga real jarayonlarning qaytmasligini aks ettiruvchi turli postulatlar qo‘yiladi. Entropiyaning ortib borishi tamoyilining boshlang‘ich postulati sifatida tabiatni bilishning umuminsoniy tajribasini umumlashtiruvchi *«Issiqlik ko‘proq issiq jismlardan kamroq issiq jismlarga o‘z-o‘zidan o‘tadi»* deb tasdiqlashni qabul qilish mumkin.

Masalan, o‘zaro bevosita issiqlik almashinishi kontaktiga kirishgan 1 va 2 jismlar o‘rtasida to‘g‘ri issiqlik almashinishining bo‘lishi, jismlar o‘rtasida haroratlar farqining bo‘lishi ($T_1 > T_2$), 1 jismdan 2 jismga qandaydir bir issiqlik miqdori (ΔQ) o‘tishini belgilaydi.

Har bir jismning (1,2) va umuman tizimning entropiyasining o‘zgarishi ($|\Delta Q|$ issiqlik almashinishining mutlaq kattaligi):

1 jism, $$\Delta S_1 = -\frac{|\Delta Q|}{T_1}; \quad \text{(a)}$$

2 jism, $$\Delta S_2 = +\frac{|\Delta Q|}{T_2}. \quad \text{(b)}$$

Umuman tizim uchun entropiyaning o‘zgarishi entropiyalar o‘zgarishining algebraik yig‘indisi bilan belgilanadi:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)|\Delta Q| > O. \quad \text{(v)}$$

SHunday qilib, jismlar o‘rtasida kompensatsiyalanmagan to‘g‘ri issiqlik almashinishi natijasida, (v) nisbatdan kelib chiqishicha, jismlar tizimining entropiyasi ortib borishi, jismlar o‘rtasida ko‘rib chiqilayotgan o‘z-o‘zidan issiqlik almashinishi esa faqatgina haroratlar farqi bilan belgilanishi natijasida shunday xulosaga kelish mumkinki, entropiyaning ortishi umumiy xarakterga ega bo‘ladi.

Qaytar jarayonlarda ichki issiqlik almashinishi bo‘lmaydi ($\delta Q^{\bullet\bullet} = O$) va shundan kelib chiqqan holda

$$dS_{обр.} = \frac{\delta Q_{обр.}}{T} = \frac{\delta Q^{\bullet}}{T}. \quad (7.14)$$

Qaytmas jarayonlar uchun, bunda $\delta Q^{\bullet\bullet} > O$ bo‘ladi, quyidagiga ega bo‘lamiz

$$dS_{необр.} = \frac{\delta Q^{\bullet} + \delta Q^{\bullet\bullet}}{T} > \frac{\delta Q^{\bullet}}{T}. \quad (7.15)$$

Shundan kelib chiqqan holda, umumiy holatda quyidagiga ega bo‘lamiz

$$S_2 - S_1 > \int_1^2 \frac{\delta Q^{\bullet}}{T}. \quad (7.16)$$

Olingan natija termodinamikaning ikkinchi asosining entropiyaning ortib borishi tamoyili sifatidagi ifodasi bo‘lib hisoblanadi.

Izolyasiyalangan tizim uchun

$$\delta Q^{\bullet} = O \quad \text{i} \quad \int_1^2 \frac{\delta Q^{\bullet}}{T} = O, \quad (7.17)$$

bo‘lganda

$$(S_2 - S_1)_{izol.} > O \;;\quad S_2 > S_1 \qquad (7.18)$$

ga ega bo‘lamiz.

Izolyasiyalangan tizimlarda real jarayonlarning kechishida entropiyaning ortib borishi hodisasi go‘yo energiyaning “degradatsiyalanishini” tavsiflaydi.

Termodinamikaning ikkinchi asosidan (entropiyaning ortib borishi tamoyilidan) bir nechta muhim amaliy oqibatlar kelib chiqadi:

1. Issiqlikni to‘liq ishga aylantirishni amalga oshirib bo‘lmaydi, ya’ni birga teng bo‘lgan foydali ish koeffitsiyentiga ega bo‘lgan ikkinchi turdagi abadiy dvigatelni yaratishning iloji yo‘q.

2. Tashqi manbalarning T_1 va T_2 haroratlarida sikllarni amalga oshiradigan har qanday qaytmaydigan issiqlik dvigatelining foydali ish koeffitsiyenti va qaytmaydigan sovutish mashinasining sovutish koeffitsiyenti xuddi o‘sha harorat manbalari o‘rtasida issiqlikning aylanishi jarayonlarini amalga oshiradigan qaytar issiqlik mashinasining foydali ish koeffitsiyenti va sovutish koeffitsiyentidan har doim kichik bo‘ladi ($\eta < \eta_{qaytar}$ va $\chi < \chi_{qaytar}$).

Real issiqlik mashinalarining foydali ish koeffitsiyenti va sovutish koeffitsiyentining qaytar issiqlik mashinasining η_{qaytar} va χ_{qaytar} ga qaraganda kamayishi bir qism ishning to‘g‘ridan-to‘g‘ri issiqlikka aylanishi (ishning qaytmaydigan yo‘qolishlari) va tashqi issiqlik manbalari bilan ishchi jism o‘rtasida oxirgi haroratlar farqi bo‘lishi bilan shartlanadi.

3. Termodinamik haroratlar shkalasining mutlaq noliga erishib bo‘lmaydi.

Bu qoida qaytar issiqlik mashinalarining foydali ish koeffitsiyentining ifodasini ikkinchi turdagi abadiy dvigatelning mavjud bo‘lmasligi tamoyilining matematik ifodasi bilan taqqoslashdan bevosita tarzda kelib chiqadi:

$$\eta_{обр.} = 1 - \frac{T_2}{T_1} < 1 \;, \qquad (7.19)$$

bundan bevosita tarzda $T_2 > 0$ (erkin tanlash huquqi bo‘yicha $T_1 > 1$) bo‘lishi kelib chiqadi.

Shundan kelib chiqqan holda, termodinamik haroratlar shkalasining mutlaq noliga erishishning iloji yo‘q. Haroratlarning mutlaq noliga erishib bo‘lmasligiga bir qator hollarda termodinamikaning uchinchi qonuni sifatida qaraladi.

Masalalar

40. Bosimi P=8 bar va t=250^{0}C bo‘lgan 1 kg kislorodning entropiyasini aniqlang. Issiqlik sig‘imi o‘zgarmas deb hisoblang.

Javob: S=0,0605 kJ/kg·K.

41. 6,4 kg azot gazining P=5 bar va t=300^{0}C bo‘lgandagi entropiyasini aniqlang. Issiqlik sig‘imini o‘zgarmas deb hisoblang.

Javob: S=1,94 kJ/kg·K.

42. 1 kg kislorod t_1=127 ^{0}C bo‘lganda hajmini 5 marotaba orttiradi, shunda harorati t_2=27^{0}C gacha kamayadi.

Issiqlik sig‘imini o‘zgarmas deb hisoblab, entropiyaning o‘zgarishini aniqlang.

Javob: ΔS=0,2324 kJ/kg·K

43. Haroratlari t_1=627 ^{0}C va t_2=27 ^{0}C bo‘lgan 1 kg havo Karno siklini bajaradi, bunda eng katta bosim 60 bar, eng kichigi esa 1 bar ga teng.

Har bir nuqtadagi parametrlarni – ish, termik FIK, keltirilgan va olib ketilgan issiqlikni aniqlang.

Echish:

1-nuqta: P_1 = 60 bar; T_1=900 K; v_1 - ?

Holat tenglamasidan:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 900}{60 \cdot 10^5} = 0,043 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

2-nuqta: T_1=900 K; R_2 - ?

2-3 adiabatik jarayon uchun:

$$\frac{P_2}{P_3} = \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 3^{\frac{1,4}{0,4}} = 46,8$$

P_2 = 1 · 46,8 = 46,8 bar

1-2 izotermik jarayon uchun

$P_1 v_1 = P_2 v_2$

$$v_2 = \frac{P_1 v_1}{P_2} = \frac{60 \cdot 0,043}{46,8} = 0,055 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

3-nuqta:

P_3 = 1 bar; T_3=300 K; v_3 - ?

$$v_3 = \frac{RT_3}{P_3} = \frac{287 \cdot 300}{1 \cdot 10^5} = 0,861 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

4-nuqta: T_4 = 300 K

4-1 adiabatik jarayon uchun:

$$\frac{P_1}{P_4} = (\frac{T_1}{T_4})^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 46{,}8$$

$$P_4 = \frac{P_1}{46{,}8} = 1{,}284 \text{ bar}$$

3-4 izotermik jarayon uchun

$P_3\, v_3 = P_4\, v_4$

$$v_3 = \frac{P_3 v_3}{P_4} = \frac{1 \cdot 0{,}861}{1{,}284} = 0{,}671 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Siklning FIK:

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{900 - 300}{900} = 0{,}667$$

Keltirilgan issiqlik miqdori:

$$q_1 = RT_1 \ell n \frac{v_2}{v_1} = 2{,}303 \cdot 0{,}287 \cdot 900\, \ell n \frac{0{,}055}{0{,}043} = 63{,}6 \text{ kJ/kg}$$

Olib ketilgan issiqlik miqdori:

$$q_2 = RT_3 \ell n \frac{v_3}{v_4} = 2{,}303 \cdot 0{,}287 \cdot 300\, \ell n \frac{0{,}861}{0{,}671} = 21{,}5 \text{ kJ/kg}.$$

Siklning ishi:

$l_0 = q_1 - q_2 = 63{,}6 - 21{,}5 = 42{,}1$ kJ/kg.

44. 1 kg azot va 1 kg vodorod harorati $t_1=15\ ^0$Cda 0,1 MPa dan 1 MPa bosimgacha izotermik siqiladi.

Qaysi gaz uchun entropiya katta bo‘ladi va necha marotaba (boshqa gazning entropiyasining o‘zgarishiga nisbatan)?

Javob: $\Delta S_{H_2} / \Delta S_{N_2} = 13{,}9$

45. Harorati 100 ^{0}C va bug‘lanish issiqligi r=2257 kJ/kg ga teng bo‘lgandagi 1 kg suvning bug‘lanishidagi entropiyasini aniqlang.

Javob: $\Delta S = 6{,}05$ kJ/kg·K

Nazorat savollari

1. Termodinamikaning ikkinchi qonunini ta’riflarini tushuntiring.
2. *T–S* diagrammaning ahamiyatini tushuntirib bering.
3. Har qanday termodinamik siklning termik FIKi bilan Karno siklining FIKini taqqoslang.
4. Har qanday termodinamik siklning sovutish koeffitsiyenti bilan Karno siklining sovutish koeffitsiyentni takkoslang.
5. Qaytar va qaytmas jarayonlarda ichki issiqlik almashinishi nimaga teng?

8. Suyuqliklar, bug‘ va gazlarning aralashmalari

8.1. Umumiy munosabatlar

Aralashma deb o‘zaro kimyoviy ta’sirlashishlarga kirishmaydigan *p* ta tarkibiy qismdan tashkil topadigan termodinamik tizimga aytiladi. SHuningdek aralashmadagi alohida tarkibiy qismlarning strukturasi aralashma hosil bo‘lishi va aralashmaning turg‘unlashishi jarayonlarida o‘zgarmaydi deb taxmin qilinadi.

Aralashmaning eng muhim tavsiflaridan biri uning tarkibi bo‘lib hisoblanadi. u tarkibiy qismlarning massa yoki molyar konsentrat-siyalari (ulushlari) bilan beriladi.

Materiyaning saqlanishi qonuniga ko‘ra quyidagiga egamiz: aralashmaning massasi (G) uni tashkil qiluvchi tarkibiy qismlarning massalarining (G_i) yig‘indisiga teng (additivlik qoidasi)

$$G = \sum_{i=1}^{n} G_i \tag{8.1}$$

Aralashmaning mollar soni aralashmadagi barcha tarkibiy qismlarning mollar soniga teng

$$\overline{G} = \sum_{i=1}^{n} \overline{G}_i \,. \tag{8.2}$$

m_i massa konsentratsiyasi yoki massa ulushi deb G_i tarkibiy qismning massasining G butun aralashmaning massasiga nisbatiga aytiladi.

$$m = \frac{G_i}{G} = \frac{G_i}{\sum_{i=1}^{n} G_i} \,. \tag{8.3}$$

r_i molyar konsentratsiya yoki molyar ulush deb $\overline{G}_i$ tarkibiy qismning mollar sonining $\overline{G}$ aralashmaning mollarining umumiy soniga aytiladi:

$$r_i = \frac{\overline{G}_i}{\overline{G}} = \frac{\overline{G}_i}{\sum_{i=1}^{n} \overline{G}_i} \,, \tag{8.4}$$

ravshanki

$$\sum_{i=1}^{n} m_i = 1 \,, \qquad \sum_{i=1}^{n} r_i = 1 \tag{8.5}$$

μ_m o‘rtacha (shunday deb hisoblanadigan) molyar massa, xuddi uning uchun $\mu = \frac{G}{\overline{G}}$ bo‘lgan sof moddaning molyar massasi kabi, aralashma massasining undagi mollar soniga nisbatiga teng:

$$\mu_m = \frac{G_i}{\overline{G}_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n} G_i}{\overline{G}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\mu_i \cdot \overline{G}_i}{\overline{G}} = \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot \mu_i \,, \qquad (8.6)$$

$$\mu_m = \frac{G_i}{\overline{G}_i} = \frac{G}{\sum_{i=1}^{n} \overline{G}_i} = \frac{G}{\sum_{i=1}^{n} \frac{G_i}{\mu_i}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{G_i}{G_i \cdot \mu_i}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{\mu_i}} . \qquad (8.7)$$

Massa va molyar konsentratsiyalar o‘rtasidagi bog‘lanish quyidagi nisbatdan aniqlanadi:

$$m_i = \frac{G_i}{G} = \frac{\mu_i \cdot \overline{G}_i}{\mu_m \cdot \overline{G}} = r_i \frac{\mu_i}{\mu_m} , \qquad (8.8)$$

yoki

$$\frac{m_i}{r_i} = \frac{\mu_i}{\mu_m} . \qquad (8.9)$$

Aralashmaning R_m gaz domiysi

$$R_m = \frac{\overline{R}}{\mu} = \sum_{i=1}^{n} m_i \cdot R_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{r_i}{R_i}} , \qquad (8.10)$$

nisbatlar bilan hisoblanadi.

Bu yerda $\overline{R}$ = *8314* J/(kmol K) – universal gaz doimiysi, R_i – aralashmaning tarkibiy qismining tavsifiy gaz doimiysi.

Suyuq, gazsimon va qattiq aralashmalar uchun ko‘pincha tarkibiy qismlarning hajmiy konsentratsiyasi tushunchasidan ham foydalaniladi. υ_i hajmiy konsentratsiya deb berilgan tarkibiy qismning V_i hajmining butun aralashmaning V hajmiga nisbatiga aytiladi:

$$v_i = \frac{V_i}{V} . \qquad (8.11)$$

8.2. Ideal gazlarning aralashmalari

Ideal gazlarning aralashmalari ham ideal gazlar bo‘lib hisoblanadi va ideal gazlarning holat tenglamasiga (Klapeyron tenglamasi) bo‘ysunadi:

$$p_m V = G R_m T_m = \overline{G}\overline{R} T_m , \qquad (8.12)$$

Bu yerda p_m, T_m - aralashmaning bosimi va harorati.

(8.12) tenglamadan kelib chiqishicha, aralashmaning noma’lum parametrlarini aniqlash uchun aralashtirishdan keyin quyidagi qiymatlarni bilish (yoki bilvosita tarzda aniqlash) zarur bo‘ladi: aralashmaning o‘rtacha bosimi yoki o‘rtacha harorati (chizma *V*= *const*)), yoki aralashmaning o‘rtacha harorati va hajmi (chizma p =*co*nst).

Aralashmaning o‘rtacha harorati va o‘rtacha bosimi umumiy tizim sifatidagi aralashmaning oxirgi diffuzion muvozanat holatini tavsiflaydi. Aralashmaning tarkibiy qismlarining holati aralashish jarayonida tarkibiy qismlarning bosimlarining dastlabki tenglashish momentidan boshlab diffuzion muvozanat holati momentigacha uzluksiz o‘zgaradi, diffuzion muvozanat holatida har bir tarkibiy qismning bosimi $p_{\nu i}$ turg‘un parsial bosim darajasigacha pasayadi.

Ideal gazlarning aralashmalarining diffuzion muvozanat qonuni (Dalton qonuni) gazlar aralashmasining qaror topgan holatini tavsiflaydi va shunday deydi: *«Gazlar aralashmasining har bir tarkibiy qismi aralashmaning butun hajmiga* (V) *tarqaladi va bu hajmda xuddi aralashmaning boshqa tarkibiy qismlar ishtirok etmagan haroratidagi kabi* $p_{\nu i}$ *parsial bosimni hosil qiladi».*

Har bir tarkibiy qism va gazlar aralashmasi uchun gazning har qanday miqdori uchun ideal gazning holat tenglamasini yozamiz

$$p_{\nu i}V = \overline{G}_i \cdot \overline{R}T\,, \tag{8.13}$$

$$p_m V = \overline{G}\overline{R}T_m\,. \tag{8.14}$$

(8.13) ni (8.14) ga bo‘lish bilan quyidagini olamiz

$$\frac{P_{\nu i}}{P_m} = \frac{\overline{G}_i}{\overline{G}} = r_i\,. \tag{8.15}$$

Bundan shu kelib chiqadiki, ideal gazlar aralashmasida tarkibiy qismning $p_{\nu i}$ parsial bosimi p_m aralashmaning to‘liq bosimi va r_i tarkibiy qismning molyar konsentratsiyasi orqali aniqlanadi

$$p_{\nu i} = r_i\, p_m \tag{8.16}$$

Oxirgi nisbat shuni ko‘rsatadiki, Dalton qonuniga ko‘ra, gazlar aralashmasidagi barcha tarkibiy qismlarning parsial bosimlarining yig‘indisi aralashmaning to‘liq bosimiga teng bo‘ladi

$$\sum_{i=1}^{n} p_{\nu i} = \sum_{i=1}^{n} r_i p_m = p_m \sum_{i=1}^{n} r_i = p_m \qquad (8.17)$$

Ideal gazning ichki energiyasi va entalpiyasi haroratning funksiyasi bo‘lib hisoblanishi sababli, ideal gazlar aralashmasining T_m o‘rtacha haroratini aniqlash soddalashadi:

$$V = const \qquad U_2 - U_1 = \sum_{i=1}^{n} \bar{G}_i \, \bar{c}_{vm,i} (T_m - T_i) = 0, \qquad (8.18)$$

$$p = const \qquad H_2 - H_1 = \sum_{i=1}^{n} \bar{G}_i \, \bar{c}_{pm,i} (T_m - T_i) = 0, \qquad (8.19)$$

bundan ideal gazlar aralashmasining o‘rtacha hvroratining umumiy hisobiy ifodasi:

$$T_m = \frac{1}{\bar{c}_{zm}} \sum_{i=1}^{n} r_i \bar{c}_{zi} T_i = \frac{1}{c_{zm}} \sum_{i=1}^{n} m_i c_{zm,i} Ti \; ; \;\; z = v, p, \qquad (8.20)$$

bu yerda $c_{zm}, \bar{c}_{zm}$- aralashmaning solishtirma massa va molyar issiqlik sig‘imlari:

$$c_{zm} = \sum_{i=1}^{n} m_i \cdot c_{z,i} \, , \qquad (8.21)$$

$$\bar{c}_{zm} = \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot \bar{c}_{z,i} \, , \qquad (8.22)$$

bu yerda $c_{z,i}$, $\bar{c}_{z,i}$ – aralashmaning i-tarkibiy qismining solishtirma massa va molyar issiqlik sig‘imlari.

Gazlarni tahlil qilishda odatda bir xil bosim va haroratda aralashmaning har bir tarkibiy qismining hajmi aniqlanadi. Bunday holda υ_i hajmiy konsentratsiya aralashmaning ma’lum bir bosim va haroratida tarkibiy qismning $V_{i,pr}$ keltirilgan hajmining xuddi o‘sha sharoitlarda butun aralashmaning V hajmiga nisbati bilan aniqlanadi

$$\upsilon_i = \frac{V_{i,np}}{V} \, . \qquad (8.23)$$

Ideal gaz uchun holat tenglamasidan:

$$V_{i,pr} = \frac{\bar{G}_i \cdot \bar{R} \cdot T_ь}{p_m} , \quad V = \frac{\bar{G} \cdot \bar{R} \cdot T_m}{p_m} . \qquad (8.24)$$

$V_{i,pr}$ va V ni (8.23) nisbatga o‘rniga qo‘yishdan keyin quyidagini olamiz:

$$v_i = \frac{\bar{G}_i}{\bar{G}} = r_i \, , \qquad (8.24)$$

bundan ideal gazlarning aralashmalari uchun tarkibiy qismlarning hajmiy va molyar konsentratsiyalari son jihatidan teng bo‘lishi kelib chiqadi.

8.3. Real gazlarning aralashmalari

Real gazlarning aralashmalari Klapeyron va Dalton qonunlariga bo‘ysunmaydi. Real gazlarnng xususiyatlarini hisoblash uchun odatda $p{\cdot}V=z{\cdot}G{\cdot}R{\cdot}T$ siqiluvchanlik koeffitsiyentiga ega bo‘lgan holat tenglamasidan foydalaniladi.

Real gazlarning aralashmalari uchun z siqiluvchanlik koeffit-siyentlari bo‘yicha umumiy ma’lumotlar mos keluvchi holatlar qonuni yordamida olinadi. Biroq, sof gazlardan farqli o‘laroq, mos keluvchi holatlar aralashmalarning amaldagi kritik parametrlari bo‘yicha emas, balki p_{pkr} keltirilgan kritik bosimlar va T_{pkr} keltirilgan kritik haroratlar bo‘yicha aniqlanadi.

Bu parametrlar aralashmaning yolg‘on kritik bosimi va harorati deb ataladi:

$$p_{пкк} = \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot p_{кр,i}\,, \qquad T_{pkr} = \sum_{i=1}^{n} r_i \cdot T_{кр,i}\,, \tag{8.25}$$

bu yerda $p_{kr,i}$ va $T_{kr,i}$ – gazlar aralashmasining alohida tarkibiy qismlarining kritik bosimi va harorati.

YOlg‘on kritik parametrlardan π keltirilgan bosimlar va τ keltirilgan haroratlarni hisoblash uchun foydalaniladi

$$\pi = \frac{P}{P_{пкр}}\,, \qquad \tau = \frac{T}{T_{пкр}}\,. \tag{8.26}$$

Ba’zi bir sof gazlarning kritik parametrlarining qiymatlari 8.1-jadvalda keltirilgan.

8.1- jadval.

Gazlarning kritik tavsiflari

Gaz	μ, kg/kmol	T_{kr}, K	R_{kr}, MPa	ρ_{kr}, kg/m^3	z_{kr}	ω
Metan, SN_4	16,04	190,55	4,600	162	0,288	0,0104
Etan, S_2N_6	30,07	305,43	4,876	212	0,285	0,0986
Propan, S_3N_8	44,09	369,82	4,246	225	0,281	0,1524
Izobutan, $i\text{-}S_4N_{10}$	58,12	408,13	3,645	221	0,283	0,1848
N-butan, $n\text{-}S_4N_{10}$	58,12	425,16	3,794	228	0,274	0,201
Izopentan, $i\text{-}S_5N_{12}$	72,15	460,4	3,381	234	0,268	0,222
N-pentan, $n\text{-}S_5N_{12}$	72,15	469,65	3,366	232	0,262	0,2539
Azot, N_2	28,01	126,26	3,400	304	0,292	0,040
Uglerod II oksidi, SO_2	44,01	304,2	7,370	468	0,274	0,231
Oltingugurtvodorod, N_2S	34,08	373,6	9,000	346	0,283	0,100

π va τ ning topilgan qiymatlarini (8.26) tenglama) hisobga olish bilan 8.1-rasmdagi diagramma bo‘yicha umuman aralashmaning siqiluvchanlik koeffitsiyenti aniqlanadi.

Masalalar

46. Havoning hajmiy tarkibi X_{N2}=79 % azot va X_{O2}=21 % kisloroddan tashkil topgan.

Azot va kislorodning massaviy ulushi, aralashmaning gaz doimiysi va molyakulyar massasi topilsin.

47. 10 kg kislorod i 15 kg azot aralashmasining bosimi P=0,3 MPa va harorati t=27 ^{0}C. Aralashmaning har bir komponentining molyar ulushi va hajmi, aralashmaning molekulyar massasi, gaz doimiysi, umumiy hajmi, parsial bosimi topilsin.

48. 0,3 m^3 hajmli havo 0,5 kg SO gaz bilan aralashadi. Aralashguncha havo va gazning parametrlari P=0,6 MPa va t=45 ^{0}C ga teng.

SO gazning aralashgandan keyingi parsial bosimini toping.

49. Tutun gazlari ω_{SO2}=16,1%, ω_{O2}=7,5%, ω_{N2}=76,4% massaviy tarkibga ega. Gazlarning t=800^{0}Cdagi 1 kg aralashmaga nisbatan entalpiyasini aniqlang.

50. Idishda 10 kg azot, 13 kg argon va 27 kg SO_2 gaz aralashmasi joylashgan. Aralashmaning molyar ulushi, molyar massasi va gaz doimiysini aniqlang.

51. YOnuvchi gazning hajmiy tarkibi: X_{N2}=3 %, X_{SO2}=3 %, X_{N2}=45 %, X_{SO}=10 %, X_{SN4}=35 %, X_{S2N4}=4 % dan iborat.

Har bir komponentning massaviy ulushi, aralashmaning molyar massasi va gaz doimiysini aniqlang.

Nazorat savollari

1. Gaz aralashmasi deb nimaga aytiladi?
2. Gaz aralashmalari necha xil ulushda beriladi?
3. Ideal gazlarning aralashmalarining diffuzion muvozanat qonuni nimani tavsiflaydi?
4. Real gazlarnng xususiyatlarini hisoblash uchun qaysi holat tenglamasidan foydalaniladi?

9. Bug‘lar va bug‘ hosil bo‘lishi

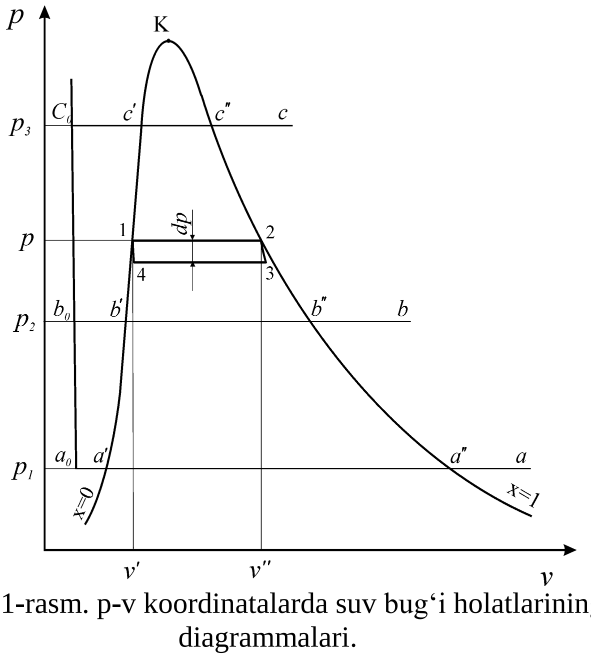
9.1. Bug‘ hosil bo‘lish jarayoni. Asosiy ta’riflar

Issiqlik-kuch qurilmalarining ish holatlarini tahlil qilishda amalda har doim har xil suyuqliklar va ularning bug‘lari bilan ish ko‘rishga to‘g‘ri keladi.

Bug‘ hosil bo‘lish jarayoni va ularning asosiy ko‘rsatkichlarini aniqlash hamma suyuqliklar uchun bir xil va uni tabiatda ko‘proq keng tarqalgan element sifatida suv misolida ko‘rib chiqish mumkin.

$p - v$ diagrammada 1 kg suvga issiqlik olib kelish jarayonini ko‘rib chiqamiz (9.1-rasm).

Suvga tashqi muhit tomonidan o‘zgarmas bosim qo‘yilgan. a_0 nuqtada suv 0^oC haroratda va r_1 bosimda bo‘ladi. Issiqlikni izlbarik tarzda olib kelish natijasida suv isiydi va a' nuqtada t_{s1} *to‘yinish haroratiga* teng bo‘lgan haroratda qaynay boshlaydi.



9.1-rasm. p-v koordinatalarda suv bug‘i holatlarining diagrammalari.

Bug‘ hosil bo‘lish jarayoni *a' a"* uchastkada r_1 o‘zgarmas bosim va t_{s1} o‘zgarmas haroratda kechadi. *a"* nuqtada suv to‘liq bug‘lanib ketadi. Bu holatda bug‘ *quruq to‘yingan bug‘* deb ataladi. *a'-a"* uchastkada suv ikkita fazada bo‘ladi va qaynayotgan suv va quruq bug‘ aralashmasidan tashkil topadi. Bu ikki fazali muvozanatli tizim *to‘yingan (nam) bug‘* deb ataladi. Keyinchalik issiqlikning izobarik tarzda olib kelinishida quruq bug‘ *o‘ta qizigan bug‘ga* aylanadi (*a* nuqta). O‘ta qizigan bug‘ berilgan bosimda qaynash haroratiga qaraganda yuqori haroratga ega bo‘ladi. *a* holatda o‘ta qizigan bug‘ning parametrlari p_1, $t_a > t_{s1}$, v_a bo‘ladi.

Suvga issiqlikni izobarik tarzda olib kelish bo‘yicha xuddi shunday tajribani boshqa p_2, p_3 va hokazo bosimlarda ham o‘tkazish mumkin. Mos keluvchi jarayonlar b_0 *b'b"b* va s_0 *s's"s* chiziqlar bilan tasvirlanadi. Suv va bug‘ning turlicha bosimlardagi bir xil holatlarining nuqtalarini chiziqlar bilan tutashtiramiz.

$a_0b_0s_0$ chiziq 0°C haroratda suvning solishtirma hajmining bosimga bog‘lanishini tavsiflaydi, ya’ni $v_0 = v_0(p)_{t=0}$. Suv kam siqiluvchan suyuqlik bo‘lganligi sababli bu chiziq deyarli vertikal bo‘ladi.

a'b's' chiziq qaynayotgan suvning solishtirma hajmining qaynash haroratiga bog‘lanishini tavsiflaydi, chunki $t_s = f(p)$. Bu chiziq *pastki chegara egri chizig‘i* deb ataladi.

Quruq to‘yingan bug‘ni tavsiflaydigan *a"b"s"* chiziq quruq bug‘ning solishtirma hajmining bosimga bog‘lanishini ifodalaydi va *yuqorigi chegara egri chizig‘i* deb ataladi. CHegara egri chiziqlari K kritik nuqtada kesishadi.

Qaynayotgan suvning parametrlari bitta shtrix bilan, quruq to‘yingan bug‘ning parametrlari esa – ikkita shtrix bilan belgilanadi. Qaynayotgan suv va quruq bug‘ni tavsiflash uchun bor-yo‘g‘i bitta parametr - *p* bosim yoki t_s to‘yinish haroratini bilish etarli bo‘ladi. Bu parametrning qiymati bo‘yicha suv bug‘ining termodinamik jadvallaridan qaynayotgan suvning barcha *v', u', i', s'* xususiyatlarining parametrlarining qiymatlarini va quruq bug‘ning barcha *v", u", i", s"* xususiyatlarining parametrlarining qiymatlarini topish mumkin.

CHegara egri chiziqlari o‘rtasidagi sohada nam to‘yingan bug‘ joylashadi. To‘yingan bug‘ning har bir haroratiga ma’lum bir bosim mos keladi, ya’ni bu parametrlar o‘rtasida bir qiymatli bog‘lanish mavjud bo‘ladi: $r = r(t_s)$.

Nam to‘yingan bug‘ni tavsiflash uchun r yoki t_s dan tashqari, ikkinchi mustaqil o‘zgaruvchi sifatida nam bug‘da quruq bug‘ning massa konsentratsiyasi qo‘llaniladi. Uni hisoblash uchun G'' quruq bug‘ning massasi va G' qaynayotgan suvning massasini bilish kerak bo‘ladi

$$x = \frac{G''}{G' + G''} = \frac{G''}{G}. \tag{9.1}$$

x kattalik *quruqlik darajasi* yoki bug‘ miqdori deb ataladi.

Pastki chegara egri chizig‘ida $x = 0$, yuqorigi chegara egri chizig‘ida $x = 1$. bo‘ladi. $(x - 1)$ kattalik *namlik miqdori* deb ataladi.

$$1 - x = \frac{G'}{G' + G''} = \frac{G'}{G}. \tag{9.2}$$

Uni quruq bug‘ga aylantirish uchun o‘zgarmas bosimda 1 kg qaynayotgan suyuqlikka olib kelinishi zarur bo‘lgan issiqlik miqdori *bug‘ hosil bo‘lishining yashirin issiqligi* deb ataladi va r bilan belgilanadi. Uning qiymatini termodinamikaning birinchi asosining tenglamasidan aniqlash mumkin:

$$\delta q = \delta q^{*} + \delta q^{**} = du + pdv = dh - vdp \tag{9.3}$$

Bug‘ hosil bo‘lish jarayoni o‘zgarmas bosimda kechishi sababli, olib kelingan issiqlik miqdorini quyidagi nisbat bilan ifodalash mumkin:

$$r = \int_{x=0}^{x=1} \delta q_p = \int_{x=0}^{x=1} dh, \qquad r = h'' - h' . \tag{9.4}$$

Bosim yoki qaynash harorati ortishi bilan r ning qiymati kamayadi va kritik nuqtada nolga teng bo‘lib qoladi.

9.2. To‘yingan va o‘ta qizigan bug‘ning xususiyatlari

Nam bug‘ binar aralashma bo‘lib hisoblanadi; uning xususiyatlari uning tarkibiga bog‘liq bo‘ladi, bu tarkib x bug‘ miqdorining kattaligi bilan tavsiflanadi.

Ma’lumki, V hajm, U ichki energiya, H entalpiya va S entropiya ekstensiv xususiyatlar bo‘lib hisoblanadi, ya’ni moddaning miqdoriga

bog‘liq bo‘ladi. Har qanday ekstensiv xususiyatni Z orqali, mos keluvchi xususiyatning solishtirma qiymatini esa z orqali belgilaymiz. SHunda $Z = zG$ bo‘ladi.

Aralashmaning ekstensiv xususiyatini hisoblash uchun additivlik qoidasini qo‘llaymiz

$$Z = Z' + Z'', \tag{9.5}$$

bu yerda Z' va Z'' — qaynayotgan suv va quruq bug‘ning ekstensiv xususiyatlari.

Ekstensiv xususiyatlarni mos keluvchi solishtirma kattaliklar bilan ifodalaymiz va ularni (9.5) tenglamaga o‘rniga qo‘yamiz

$$Gz = G'z' + G''z''. \tag{9.6}$$

(9.6) tenglamaning a’zolarini G ga bo‘lamiz va (9.2), (9.3) tenglamalarni hisobga olish bilan quyidagini olamiz

$$z = G(1 - x)z' + xz'' = z' + (z'' - z')x, \tag{9.7}$$

(9.7) nisbat yordamida nam bug‘ning holatining asosiy parametr-larini aniqlash uchun tenglamalarni (mos ravishda solishtirma hajm, ichki energiya, entalpiya va entropiyani aniqlash uchun tenglamalarni) yozish mumkin:

$$v = v' + (v'' - v'')x; \tag{9.8}$$

$$u = u' + (u'' - u')x; \tag{9.9}$$

$$h = h' + (h'' - h')x = h' + rx; \tag{9.10}$$

$$s = s' + (s'' - s')x = s' + \frac{r}{T_s}x. \tag{9.11}$$

O‘ta qizigan bug‘ning entalpiyasi, entropiyasi va ichki energiyasi bu parametrlarning izobarik o‘ta qizdirish jarayonida o‘sish tenglamalaridan aniqlanadi. Mazkur jarayon uchun (holatlar ideal gazning holatlariga yaqin bo‘lganligi uchun) quyidagi nisbatlar adolatli bo‘ladi:

$$dh = c_p dT; \qquad ds = c_p \frac{dT}{T} \tag{9.12}$$

T_s to‘yinish haroratidan T o‘ta qizigan bug‘ning haroratigacha integrallashdan keyin quyidagini olamiz:

o‘ta qizigan bug‘ning entropiyasi uchun

$$s = s'' + c_{mp} ln\frac{T}{T_s} \tag{9.13}$$

o‘ta qizigan bug‘ning entalpiyasi uchun

$$h = h'' + c_{pm}(T - T_s),\qquad(9.14)$$

ichki energiya uchun

$$u = h - p(v - v''),\qquad(9.15)$$

Bu yerda h'' – quruq to‘yingan bug‘ning solishtirma entalpiyasi; s_{pm} – o‘ta qizigan bug‘ning T-T_s haroratlar oralig‘iida o‘rtacha issiqlik sig‘imi; u – solishtirma ichki energiya; v, v'' - mos ravishda o‘ta qizigan bug‘ va quruq to‘yingan bug‘ning solishtirma hajmlari.

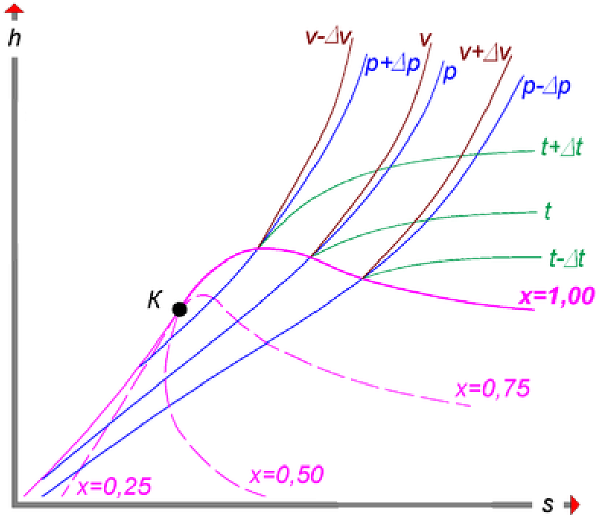
O‘ta qizigan bug‘ning sohasi, 9.2-rasmdagi diagrammadan ko‘rinib turganidek, kritik izobara bilan yuqorigi chegara egri chizig‘ining o‘rtasida joylashadi.

O‘ta qizigan suv bug‘ining v, h, s, u, s_p va s_v xususiyatlari odatda termodinamik jadvallarda suv bug‘ining bosim va haroratdan funksiyalari ko‘rinishida keltiriladi.

Suv bug‘i uchun analitik bog‘lanishlarning murakkabligi sababli, jadval ma’lumotlari bilan bir qatorda turli termodinamik jarayonlarni *T-s* va *h-s* entropiya diagrammalari yordamida hisoblashning grafik uslublaridan ham foydalaniladi. Bu diagrammalarga (9.2-rasm) odatda pastki chegara egri chiziqlari ($x=0$), vertikal chegara egri chiziqlari ($x=1$), izobaralar ($p=const$), izoxoralar ($v=const$), izotermalar ($T=const$) va doimiy bug‘ miqdori chiziqlari ($x=const$) kiritiladi. Nam bug‘ sohasida izobaralar va izotermalar bir-biriga mos tushadi. O‘ta qizigan bug‘ sohasiga o‘tilganda izobaralar va izotermalar ajraladi va ularning har biri o‘zida alohida egri chiziqni taqdim qiladi.

Nam bug‘ sohasida izobaralar va izotermalar *T-s* diagrammada gorizontal to‘g‘ri chiziqlar, *h–s* diagrammada esa - egilgan to‘g‘ri chiziqlar ko‘rinishida tasvirlanadi.

Bu diagrammalardan *h–s* diagramma eng katta amaliy qiziqish uyg‘otadi, bu avvalambor adiabatik jarayonda solishtirma ish mazkur diagramma bo‘yicha jarayonning boshlang‘ich va oxirgi nuqtalari o‘rtasidagi kesmaning kattaligi (h_1–h_2) sifatida aniqlanishi bilan bog‘lanadi.



9.2-rasm. Suv bug‘ining *h-s* holat diagrammasi.

T-s va *h-s* entropiya diagrammalarida qaytar adiabatik jarayonlar (izoentropik jarayonlar), yuqorida aytib o‘tilganidek, vertikal kesmalar bilan tasvirlanadi.

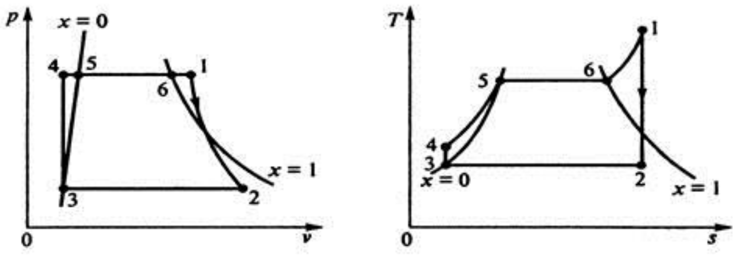
T-s diagrammadan asosan turli sikllarni termodinamik tahlil qilish uchun foydalaniladi. U mos keluvchi maydonlar bo‘yicha ko‘rib chiqilayotgan siklda ishchi jismga olib kelingan va undan olib ketilgan issiqlik miqdorini va siklning ishini aniqlash imkonini beradi. Biroq sikllarni hisoblash uchun *T-s* diagramma noqulay bo‘lib hisoblanadi, chunki asosiy parametrlardan biri – bug‘ning entalpiyasi – jarayonning berilgan nuqtasida shu nuqta orqali o‘tadigan izobaraning ostidagi maydon bilan aniqlanadi. SHu sababli suv bug‘ining jarayonlarini hisoblashda ko‘proq *h–s* diagrammadan foydalaniladi.

Masalalar

52. h-s diagrammadan foydalanib, p=15 MPa, t=570 ^{0}C bo‘lgan o‘ta qizigan bug‘ning entalpiyasi *h*, solishtirma hajmi *v* va entropiyasi *S* ni toping.

53. h-s diagrammadan foydalanib, p= 1,5 MPa, bo‘lgan quruq to‘yingan bug‘ning entalpiyasi h'', solishtirma hajmi v'', entropiyasi S'' va haroratini toping.

54.Dastlabki bosimi P_1 = 10 MPa va quruqlik darajasi x_1 = 0,95 bo'lgan bug' o'ta qizdirgichga kiradi, bu yerda uning harorati Δt = 260^0C ga ko'tariladi, o'ta qizdirgichdan keyin bug' turbinada adiabatik ravishda P_2 = 4 kPa bosimgacha kengayadi. (h-s diagrammasi bo'yicha) o'ta qizdirgichda berilgan issiqlik miqdorini (1 kg bug'ga), Renkin siklining ishini va kengayish oxirida bug'ning quruqligi x_2 darajasini aniqlang. Shuningdek, tsiklning termik foydali ish koeffitsiyenti va solishtirma bug' sarfini aniqlang. Agar o'ta qizdirgichdan keyin bug' P_1'' = 2 MPa bosimiga tushirilsa, tsiklning ishini va oxirgi quruqlik darajasini aniqlang. Bug' turbinasi bloki va Renkin tsiklining diagrammasini *p* - *V* va *T* - *s* diagrammalarida chizing.



Dastlabki holat - nuqta 0 - izobar p_1 = 10 MPa va doimiy quruqlik darajasi x_1 = 0,95 kesishmasida bo‘ladi. Bu nuqtada entalpiya h_0 = 2660 kJ / kg, harorat t_0 = 310^0C. O'ta qizdirgichdan keyin bug'ning holati - 1 nuqta - izobar chizig'i p_1 = 3 MPa va izoterma $t = t_0 + \Delta t$ = 310 + 260 = 570^0C kesishmasida bo‘ladi. Bu nuqtada entalpiya h_1 = 3550 kJ / kg ni tashkil qiladi. Bug'ning oxirgi holati - 2 nuqta - izobar p_2 = 4 kPa va doimiy entropiya chizig'ining kesishmasida bo‘ladi. Bu nuqtada entalpiya h_2 = 2060 kJ / kg, quruqlik darajasi x_2 = 0,78 ga teng. To'yingan suv bug'lari uchun jadvallarga ko'ra, biz p_2 = 4 kPa, h'_2 = 121,42 kJ / kg [1] da aniqlaymiz.

Bug‘ qizdirgichdagi bug'ga beriladigan issiqlik miqdori:

$q = h_1 - h_0$ = 3550 - 2660 = 890 kJ/kg.

Renkin tsikli ishi:

$l_0 = h_1 - h_2$ = 3550 - 2060 = 1490 kJ/ kg.

Solishtirma bug' sarfi:

$d_0 = 3600 / (h_1 - h_2) = 3600 / (3550 - 2060) = 2,43$kg / (kVt·soat).

Tsiklning termik foydali ish koeffitsiyenti

$\eta_t = (h_1 - h_2) / (h_1 - h'_2) = (3550 - 2660) / (3550 - 121,42) = 0,435$.

Bug‘ qizdirgichdan keyin bug' $p_1'' = 2$ MPa bosimiga tushiriladi. Bug'ning oraliq holati - nuqta 2a - doimiy entalpiya chizig'i $h_1 = 3550$ kJ/kg va izobar $p_1'' = 2$ MPa kesishmasida bo‘ladi. Bug'ning oxirgi holati - 2 nuqta - izobar $p_2 = 4$ kPa va doimiy entropiya chizig'ining kesishmasida bo‘ladi. Bu nuqtada entalpiya $h_2 = 2270$ kJ/kg, quruqlik darajasi $x_2 = 0,884$. To'yingan suv bug'lari uchun jadvallarga ko'ra, biz $p_2 = 4$ kPa $h'_2 = 121,42$ kJ / kg [1] da aniqlaymiz.

Bug‘ qizdirgichdagi bug'ga beriladigan issiqlik miqdori:

$q = h_1 - h_0 = 3550 - 2660 = 890$ kJ / kg.

Renkin tsikli ishi:

$l_0 = h_{2a} - h_2 = 3550 - 2270 = 1280$kJ / kg.

Solishtirma bug' sarfi:

$d_0 = 3600 / (h_1 - h_2) = 3600 / (3550 - 2270) = 2,81$kg / (kVt ·soat).

Tsiklning termik foydali ish koeffitsiyenti

$\eta_t = (h_{2a} - h_2) / (h_1 - h'_2) = (3550 - 2270) / (3550 - 121,42) = 0,373$.

55. YOpiq idishda parametrlari $x_1=0,98$, $t_1=252^0$C, $t_2=400^0$C bo‘lgan 1 kg nam to‘yingan bug‘ni o‘ta qizigan bug‘ga aylantirish uchun qancha issiqlik keltirish kerak?

56. Bug‘ning quyidagi holati berilgan. p=3 MPa va $t=360^0$C h-s diagrammasidan foydalanib, entropiya, harorat va bug‘ning qizdirilish darajasini aniqlang.

57. Bosimi p=0,85 MPa va quriganlik darajasi x=0,95 bo‘lgan suv bug‘ining h_x, S_x va v_x parametrlarini h-s diagrammadan foydalanib aniqlang. Olingan natijalarni esa ifoda va jadval yordamida olingan natijalar bilan solishtiring.

58. Bosimi p=15 MPa va quriganlik darajasi x=0,96 bo‘lgan 1kg nam bug‘ni $t=460^0$C gacha qizdirish uchun kerak bo‘ladigan issiqlik miqdorini aniqlang.

59. Bosimi p=1,4 MPa va solishtirma hajmi $v=0,22$ m^3/kg ga teng bo‘lgan suv bug‘ining holatini aniqlang.

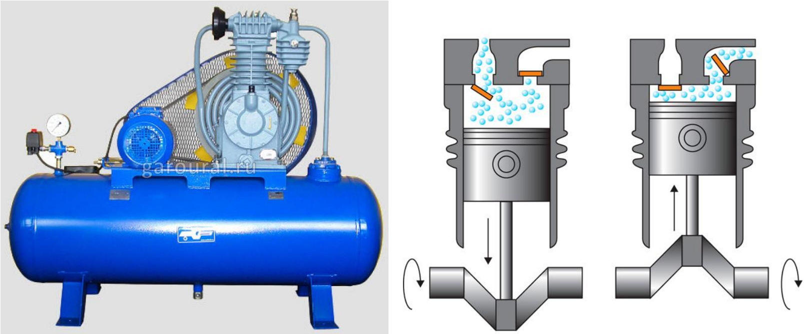
60. Agar p=2 MPa va x=0,9 bo‘lsa, nam bug‘ining solishtirma hajmini toping.

Nazorat savollari

1. Bug‘ hosil bo‘lish jarayonida kanday buglar hosil bo‘ladi?
2. T o‘yingan va to‘yinmagan bug deb nimaga aytiladi?
3. Quruqlik darajasi nimani ifodalaydi?
4. Suv bug‘ining *h-s* holat diagrammasida qaysi parametrlar chiziqlari joylashgan?
5. Suv bug‘ining *h-s* holat diagrammasida bug‘larning joylashishini tushuntirib bering?

10. Kompressorlarda siqish

Kompressor mashinalari tushunchasi gazlar va bug‘larni siqish uchun mo‘ljallangan mashinalarning barcha mumkin bo‘lgan tiplarini qamrab oladi. Harakat tamoyili bo‘yicha kompressorlarni uchta asosiy guruhga – hajmiy, kurakli va oqimli kompressorlarga bo‘lish mumkin. Hajmiy kompressorlarga porshenli, rotatsion va vintli kompressorlar kiradi. Kurakli kompressorlarga markazdan qochma va o‘qli kompressorlar kiradi. Oqimli kompressorlar o‘ta kichik FIK tufayli sanoatda keng tarqalishga ega bo‘lmagan.



a) b)

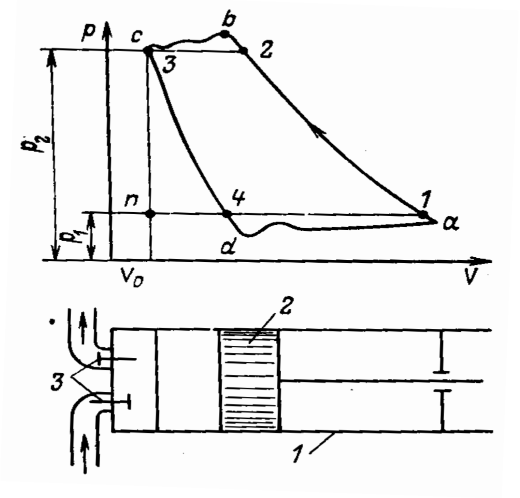
10.1-rasm. Bir pog‘onali porshenli kompressorning umumiy ko‘rinishi (a) va kompressor porshenining ilgarilanma-qaytar harakati (b)

Kompressor mashinalarining ishini tavsiflaydigan asosiy parametrlar deb siqish bosimlarining nisbati va ularni berishni hisoblash mumkin, siqish bosimlarining nisbati kompressorning orqasidagi bosimning kompressorning oldidagi bosimga nisbati sifatida aniqlanadi. Berish deganda gaz yoki bug‘ning kompressor beradigan sekundlik yoki soatlik miqdori tushuniladi, u metr kublarda yoki gaz yoki bug‘ kompressorga kirishda ega bo‘lgan parametrlarda o‘lchanadi.

Bir pog‘onali porshenli kompressor (10.2-rasm) 1 silindr, ilgarilanma-qaytar harakat qiladigan 2 porshen va ikkita 3 klapan – so‘ruvchi va haydaydigan klapandan tashkil topadi.

Kompressor quyidagi tarzda ishlaydi: 2 porshen chapdan o‘ngga qarab harakatlanganda silindrdagi gazning bosimi so‘ruvchi naychadagi bosimga qaraganda kichik bo‘lib qoladi. So‘ruvchi klapan ochiladi

va porshen chekka holatga qarab harakatlanganda silindrning bo‘shlig‘i n_1 nazariy chiziq bo‘yicha gaz bilan to‘ladi. Porshen orqaga – o‘ngdan chapga qarab harakatlanganda so‘ruvchi klapan yopiladi va porshen silindrdagi gazni 1-2 nazariy egri chiziq bo‘yicha silindrdagi gazni quvurlar tizimining haydash liniyasidagi gazning bosimiga teng bo‘l-gan r_2 bosimgacha siqadi. Haydovchi klapan ochiladi va porshen gazni r_2 o‘zgarmas bosim bilan quvurlar tarmog‘ining haydash liniyasiga haydaydi (2–3 chiziq).



a)

b)

10.2-rasm. Bir pog‘onali porshenli kompressorning indikator diagrammasi (a) va prinsipial chizmasi (b)

Porshen chapdan o‘ngga yangi yurishni boshlaganda so‘ruvchi klapan yana ochiladi, silindrdagi bosim nazariy jihatdan bir onda r_2 dan r_1 gacha tushadi (3–n chiziq) va jarayon takrorlanadi.

123p maydon ideal kompressor tomonidan valning bir marta aylanishida gazni siqishga sarflanadigan ishni tavsiflaydi.

Real kompressorlarda kechadigan jarayonlar etarlicha murakkab, chunki bunda zararli kenglikning ta’sirini hisobga olish zarur bo‘ladi, bu kenglik shu bilan shartlanadiki, porshen eng chekka chapki holatda silindrning qopqog‘igacha zich taqalib kela olmaydi va porshen bilan qopqoq o‘rtasida har doim qandaydir bir bo‘sh hajm qoladi. Real kompressorlarda gazning klapanlar orqali oqishida bosimning

yo‘qolishi, porshenning silindrning devorlariga ishqalanishi, gazning zichlashtirilmagan joylar orqali sizishi va hokazolarni hisobga olishga to‘g‘ri keladi. Bularning barchasi birgalikda porshenli kompressorning indikator diagrammasining ko‘rinishini kuchli darajada o‘zgartiradi. Xususan, porshen chapdan o‘ngga qarab yurganda zararli kenglikda siqilgan gazning bo‘lishi tufayli silindrdagi gazning bosimi 3–*n* chiziq bo‘yicha oniy tarzda emas, balki 3-4 chiziq bo‘yicha o‘zgaradi. So‘ruvchi klapan r_1 bosimda emas, *d* nuqtaga mos keladigan bosimda ochiladi.

Xuddi shuning o‘zi haydovchi klapanning ishlashiga ham tegishli bo‘ladi, u r_2 bosimga qaraganda biroz kattaroq bosimda ochiladi.

Kompressorning ishini indikator diagrammasi bo‘yicha tahlil qilish bilan kompressor aylanma jarayon (yoki sikl) bo‘yicha ishlaydi deb bo‘lmaydi (ba’zan shunday deyiladi), chunki kompressorda 1-2 chiziq bo‘yicha (yoki real kompressorda a–b chiziq bo‘yicha) faqatgina siqish jarayoni amalga oshiriladi. So‘rish (4–1 chiziq) va haydash (2–3 chiziq) paytida gazning holati nazariy jihatdan o‘zgarmaydi.

Kompressorda gazni termodinamik siqish jarayonini tahlil qilishda odatda gazni siqishga sarflanadigan ishni, siqish jarayonining oxirgi haroratini aniqlash asosiy qiziqish uyg‘otadi.

Siqish jarayonining solishtirma ishini termodinamikaning birinchi asosining oqim uchun yozilgan tenglamasidan topish mumkin. Bunda kompressorda siqish jarayoni quyidagi sharoitlarda kechadi deb taxmin qilinadi: Atrof muhit bilan issiqlik almashinishi juda kichik va shundan kelib chiqqan holda $q^*_{1,2} = 0$; so‘ruvchi va haydovchi naychalarda gazning harakatlanish tezliklari teng $s_1 = s_2$; oqimning og‘irlik markazi balandligining o‘zgarishini hisobga olmaslik mumkin $z_1 = z_2$; qaytmaydigan yo‘qolishlar yo‘q ($w_{1,2}^{**} = 0$). Bunday sharoitlarda tenglama soddalashadi va 1 kg gaz yoki bug‘ni kompressorda siqishga sarflanadigan solishtirma ish quyidagi munosabatdan aniqlanadi.

$$w_{1,2} = h_1 - h_2. \qquad (10.1)$$

Ideal gaz uchun tenglama quyidagi ko‘rinishni oladi

$$w_{1,2} = h_1 - h_2 = c_p(T_1 - T_2), \qquad (10.2)$$

bu yerda c_1 – o‘zgarmas bosimda gazning issiqlik sig‘imi, J/(kg·°S); T_1, T_2 – siqish jarayonining T_1 boshlang‘ich va T_2 oxirgi haroratlari, K; $w_{1,2}$ – siqishning solishtirma potensial (yoki texnik) ishi, J/kg.

$w_{1,2}$ kattalik - manfiy, chunki siqishda ish sarflashga to‘g‘ri keladi, biroq hisoblashlarda, qulay bo‘lishi uchun u musbat deb – mutlaq qiymat bo‘yicha qabul qilinadi.

Ifodadan ko‘rinib turibdiki, solishtirma siqish ishi mutlaq kattalik bo‘yicha siqiladigan gaz yoki bug‘ning entalpiyasining ortishiga teng

$$|w_{1,2}| = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1). \qquad (10.3)$$

Agar kompressor orqali o‘tadigan gaz sarfini *G* (kg/s) deb belgilasak, u holda kompressorda gazni siqishga sarflanadigan quvvatni aniqlash mumkin

$$N = G(h_2 - h_1). \qquad (10.4)$$

Ideal gaz uchun $N = Gc_p(T_2 - T_1).$ (10.5)

Olingan tenglamalar porshenli kompressorlar uchun ham, kurakli kompressorlar uchun ham adolatli, shu sababli gazni porshenli yoki kurakli kompressorlarda siqish jarayoni termodinamik nuqtai-nazardan bir xil. Tenglamalar barcha real gazlar uchun, shuningdek suyuqliklarni haydashda nasoslarda sarflanadigan ish va quvvatni aniqlash uchun ham adolatli.

Qaytar adiabatik jarayon uchun quyidagiga egamiz

$$w_{1,2} = c_p(T_2 - T_1) = c_p T_1\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) = c_p T_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right] =$$

$$= \frac{k}{k-1} p_1 \upsilon_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right] = \frac{k}{k-1} RT_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]. \qquad (10.6)$$

Real jarayonda gazni siqishdagi ish η_{ic} kompressorning ichki nisbiy FIK tushunchasini kiritgandan keyin aniqlanadi, u siqishda qaytmaydigan yo‘qolishlarni tavsiflaydi

$$w_i = \frac{1}{\eta_{ic}} w_{1,2} = \frac{1}{\eta_{ic}} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot RT_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]. \qquad (10.7)$$

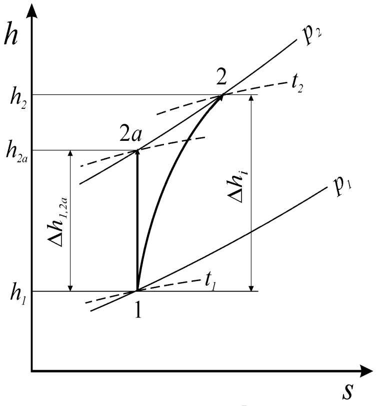
10.3-rasmdagi diagrammadan ko‘rinib turibdiki, real kompressorda qaytmaydigan yo‘qolishlar tufayli siqish jarayonining chizig‘i qaytar jarayonning chizig‘idan o‘ngroqda joylashadi. Bu shu bilan bog‘lanadiki, qaytmaydigan yo‘qolishlar ichki issiqlik almashinishining issiqligiga aylanadi $\delta w^{**} = \delta q^{**} \neq 0$ va bunda entropiya ortadi.

1–2 va 1–2' jarayonlarda $w_{1,2'}$ va $w_{1,2\;2}$ potensial ishlarning nisbati ichki qaytmaydigan yo‘qolishlarni tavsiflaydi va kompressorning nisbiy ichki FIK ni belgilaydi

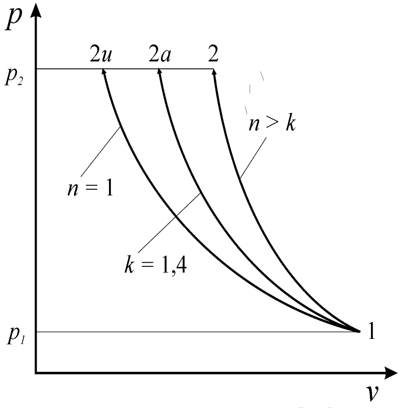
$$\eta_{ic} = \frac{w_{1,2}}{w_{1,2'}} < 1. \quad (10.8)$$

10.4-rasmdagi diagrammadan ko‘rinib turibdiki, adiabatik siqish jarayonidan (1–2 chiziq) izotermik siqish jarayoniga (1–2' chiziq) o‘tish siqish ishining kamayishiga olib keladi va aksincha bo‘ladi. Izotermik jarayon uchun qaytar siqilishning solishtirma ishini quyidagi tenglamadan aniqlash mumkin (mutlaq kattalik bo‘yicha):

$$|l_{1,2}| = |w_{1,2}| = 2{,}3 p_1 \upsilon_1 \, lg \frac{p_1}{p_2} = 2{,}3 R T_1 \, lg \frac{p_1}{p_2}. \quad (10.9)$$



10.3-rasm. Kompressorda siqish jarayonining

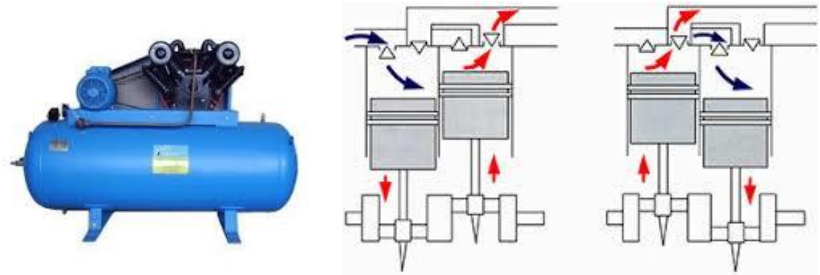


10.4-rasm. Jarayonning turlicha *h-s* diagrammadagi grafigi ko‘rsatkichlarida kompressorda siqish jarayonining grafigi

Kompressorlarda izotermik jarayonni amalga oshirishda jarayon davomida harorat o‘zgarmasdan qolishi uchun doimo issiqlikni olib ketish talab qilinadi, amaliy jihatdan anchagina qiyin. Izotermik siqish jarayoni go‘yo etalon jarayon bo‘lib hisoblanadi, amaliyotda gazni kompressorlarda siqish real jarayonini unga yaqinlashtirishga harakat qilinadi.

10.1. Ko‘p pog‘onali kompressorning termodinamik jarayoni

Bir pog'onali kompressorli qurilmalarning kamchiliklaridan biri cheklangan ish bosimi hisoblanadi. Ushbu turdagi porshenli kompressorning ishlashi bosimni atigi 10 atmosferagacha hosil qilishi mumkin. Buning sababi, yuqori bosimda silindrdagi harorat keskin ko'tariladi va qismlarni moylash uchun ishlatiladigan yog 'yonib ketishi mumkin.

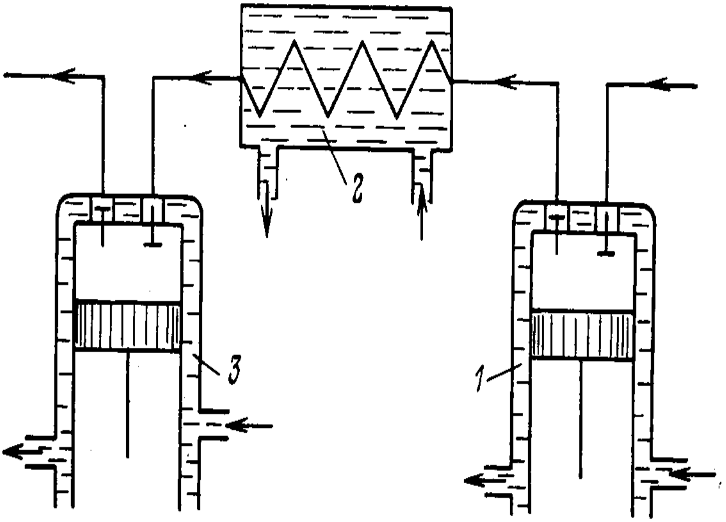


10.5-rasm. Ikki pog‘onali porshenli kompressorning umumiy ko‘rinishi (a) va kompressor porshenlariining ilgarilanma-qaytar harakati (b)

Shu sababli yuqori bosimli gazni olish uchun ko‘p pog‘onali kompressorlardan foydalaniladi, ular o‘zida ketma-ket tutashtirilgan bir nechta bir pog‘onali kompressorlarni taqdim qiladi.

Alohida bosqichlar orasiga issiqlik almashinish qurilmalari o‘rnatiladi, ular oldingi bosqichda siqilgan gazning sovushini ta’minlaydi (10.5-rasm).

Gaz r_1 bosim bilan kiritish klapani orqali 1 past bosimli kompressorga kirib keladi, bu yerda 1-2 chiziq bo‘yicha politrop tarzda siqiladi (10.6,a-rasm), bunda bir qism issiqlik kompressorning devorlari orqali chiqib ketadi. Siqilgan havo 2 sovutgichga kelib tushadi, bu yerda zmeevik orqali o‘tishda oqar suv bilan T_1 boshlang‘ich haroratgacha sovuydi (2–2' chiziq) va 3 yuqori bosimli kompressorga kirib keladi. Bu yerda issiqlikning bir qismini olib ketish bilan yana siqiladi (2'–3 jarayon) va chiqish liniyasiga chiqariladi.



10.5-rasm. Ikki pog‘onali kompressorning chizmasi: 1-siqishning birinchi pog‘onasi (past bosimli kompressor); 2- oraliq sovutgich; 3-siqishning ikkinchi pog‘onasi (yuqori bosimli kompressor)

Gazni sovutgichda oraliq sovutish ishda kattagina foyda keltiradi, bu ish *r– v* koordinatalarda 22'33' maydon bilan o‘lchanadi (10.6,b-rasm). Gazning sovutgichda bergan issiqligi *T–s* koordinatalarda 22'sb maydon bilan o‘lchanadi.

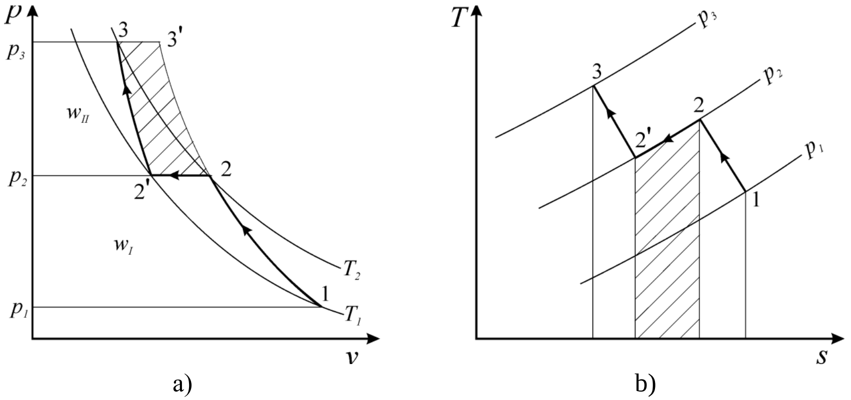
Eng kichik siqish ishini olish uchun ko‘p pog‘onali kompressorlarni loyihalashda, birinchidan, kompressorning barcha bosqichlariga kirishda gazning harorati teng bo‘lishini ta’minlashga, ikkinchidan, kompressorning barcha bosqichlarida siqish ishining teng bo‘lishini ta’minlashga harakat qilinadi. Agar kompressorning har bir bosqichida bosimning ortish darajasi bir xil bo‘lsa, keyingi shartni bajarsa bo‘ladi.

Bosimning ortish darajasi deganda gazning bosqichdan chiqishdagi bosimining uning bosqichga kirishdagi bosimiga nisbati tushuniladi, ya’ni:

$$x_1 = p_2/p_1 = x_2 = p_3/p_2. \qquad (10.10)$$

va

$$w_I = w_{II}. \qquad (10.11)$$



10.6-rasm. Gazni ikki pog‘onali kompressorda siqishning *p-v* (a) va *T-s* (b) koordinatalardagi diagrammasi.

Agar kompressorda ikkita emas, *t* ta bosqich bo‘lsa, u holda ideal kompressorda bosimlarning bosqichlar o‘rtasida taqsimlanishi quyidagi shartga javob berishi lozim

$$x_1 = x_2 = \ldots = x_m = \sqrt[m]{x}. \qquad (10.12)$$

Shunday qilib, kompressorda gazning $r_{boshlang‘ich}$ boshlang‘ich va r_{oxirgi} oxirgi bosimlarini bilish bilan siqish bosimlarining $x=r_{oxirgi}/r_{boshlang‘ich}$ umumiy nisbatini aniqlash va bosqichlar bo‘yicha siqish bosimini hisoblash mumkin. So‘ngra tenglama bo‘yicha har bir bosqichda siqish ishini hisoblash va bosqichlar bo‘yicha siqish ishini yig‘indilash bilan umuman kompressorning umumiy siqish ishini aniqlash mumkin.

Kompressorda siqish bosqichlari qanchalik ko‘p bo‘lsa, jarayon izotermik jarayonga shunchalik yaqinlashadi va kompressor shunchalik murakkab va shunchalik qimmat bo‘ladi. Sovutgichlar trakti bo‘ylab gazning qarshiligi unchalik katta bo‘lmaydi va shu sababli issiqlikni olib ketish jarayonlari izobaralar bo‘yicha amalga oshadi deb hisoblanadi.

Masalalar

61. Porshenli kompressor daqiqada V = 2,4 m^3 havo beradi (hajmi normallashtiriladi). Ressiverdagi havo bosimini p_1 = 0,2 MPa dan p_2 = 0,8 MPa gacha ko'tarish uchun ushbu kompressor qancha vaqt oladi. Ressiverning hajmi V_r = 5 m^3, havo harorat t = 20^0C.

Havoning gaz doimiysi R=287 J/kg·K va normal sharoitda zichligi ρ=1,205 kg/m^3. Ideal gaz holat tenglamasidan bosimini belgilangan qiymatga oshirish uchun havo massasi qancha ortishi kerakligini hisoblaymiz.

$p_1 \cdot V_R = M_1 \cdot R \cdot T_1 \qquad p_2 \cdot V_R = M_2 \cdot R \cdot T_2$

Haroratni teng deb olamiz:

$T_1 = T_2 = t + 273 = 20 + 273 = 293$

$(M_1 - M_2) = (p_2 - p_1) \cdot V_R / (R \cdot T_1) = (0{,}8 - 0{,}2) \cdot 10^6 \cdot 5 / (287 \cdot 293) = 35{,}676$ kg

Kompressorning massaviy quvvatini hisoblaymiz:

$G = V \cdot \rho = 2{,}4 \cdot 1{,}205 = 2{,}892$ kg/min.

Kompressorni berilgan massaviy quvvatida havoning massasi (M_1-M_2) necha minutda ortishini aniqlaymiz:

$\tau = (M_1 - M_2)/G = 35{,}676/2{,}892 = 12{,}34$ min.

62.Tsilindrda p = 5,1 atm bosim va harorat ostida havo mavjud t_1 = 135 ℃. V_1 = 0,88 m^3 hajmni egallaydi. Agar doimiy bosimda uning harorati t_2 = 0℃ ga tushirilsa, havo hajmi V_2, m^3 nimaga teng bo'lishini aniqlang. Tarqalgan issiqlik miqdorini va mukammal ish aniqlang. Berilgan havo o'rtacha issiqlik sig'imi cp harorat bo‘yicha adabiyot jadvaliga muvofiq olinadi.

63.Havo gaz turbinasi kompressorida siqiladi. Boshlang'ich havo harorati t_1 = 30 ℃, siqilishdan keyingi oxirgi harorat t_2 = 150 ℃. molekulyar - kinetik nazariyatsh bo‘yicha, issiqlik sig'imi qiymatlarini hisobga olgan holda siqish jarayonida havoning entalpiyasi va ichki energiyasining o'zgarishini aniqlang.

64. Dastlabki parametrlari p_1 = 0,1 MPa va T_1 = 300 K bo'lgan havo, ichki yonuv dvigatelining turbokompressorida adiabatik tarzda p_2 = 0,28 MPa bosimiga siqiladi. Keyin havo muzlatgichga kiradi, bu yerda doimiy ravishda bosim, uning harorati 37 ℃ ga tushadi. Kompressorlfub siqish ishi va 1 kg havodan olib ketilgan issiqlik miqdorini aniqlang.

65.Harakatlanuvchi porshenli silindr t = 80 °C va vakuum bosim 427 gPa ga teng kislorodni o'z ichiga oladi. Kislorod doimiy ravishda

Popt=1,2 MPa ortiqcha bosimgacha bo'lgan siqiladi. Barometrik bosim P_{bar} = 993 gPa. Kislorod miqdori necha marta kamayadi.

Nazorat savollari

1. Kompressorning vazifasi nimadan iborat?
2. Kompressor kanday elementlardan iborat?
3. Kompressorlarni kanday guruhlarga bulinadi?
4. Kompressorning indikator diagrammasini tushuntirib bering.
5. Bir va ko‘p pog‘onali kompressorning termodinamik jarayonini tushuntirib bering.
6. Kompressorning FIK ni nimaga teng?

11. Yoqilg‘i va uning xossalari

Yoqilg‘i deb yonganda muayyan miqdorda issiqlik ajratadigan uglerod va uglevodorodli moddalar, energiya manbaiga aytiladi. Qattiq, suyuq va gaz holatida bo‘ladi, tabiiy hamda sun’iy xillarga bo‘linadi. Tabiiy qattiq yoqilg‘i – yog‘och, torf, slanets, toshko‘mir, antratsit va boshqalar, sun’iy yoqilg‘i - pista ko‘mir, koks, aglomerat va b. Tabiiy suyuq yoqilg‘i – neft, sun’iysi – benzin, kerosin, mazut va b., tabiiy gazeimon yoqilg‘i – tabiiy gaz, sun’iysi – domna gazi, generator gazi va b. Atom energiyasi va yarimo‘tkazgichlardan foydalanish texnikasi hamda nazariyasining rivojlanishi bilan yangi xil yoqilg‘i – yadro yoqilg‘i paydo bo‘ldi. Iqtisodiy nuqtai nazardan eng arzon yoqilg‘i –neft va tabiiy gaz. Dvigatellarda ishlatiladigan yoqilg‘i (mas, benzin, kerosin, yadro yoqilg‘isi, reaktiv yoqilg‘i va b.) yonilg‘i deb ataladi. Har qanday yoqilg‘i va yonilg‘i issiqlik ajratuvchanlik xossasi bilan ifodalanadi.

12.1-rasm. 1-ko‘mir, 2-torf, 3-neft

11.1. Yoqilg‘i tarkibi

Yoqilg‘ining tarkibiy tuzilishi uning dastlabki eng muhim tavsifi bo‘lib, turli yoqilg‘i ishlatiladigan qurilmalarda kechadigan jarayon-larni yoki uni texnologik qayta ishlashni tahlil qilishda foydala-niladigan bir qator ko‘rsatkichlarining shaklanishini belgilaydi.

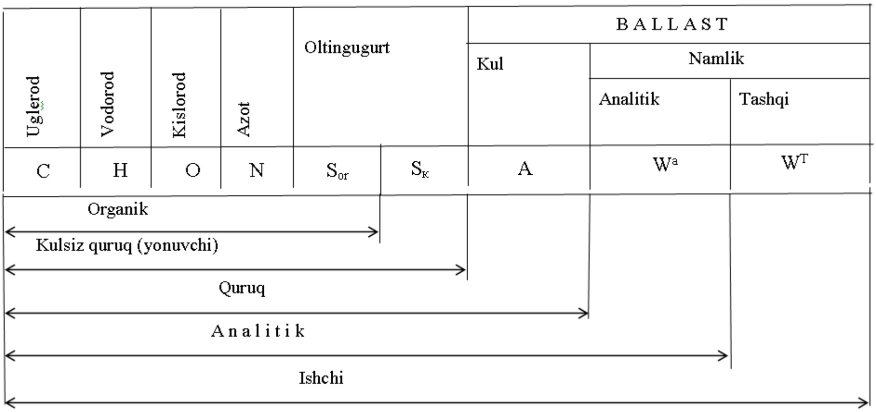
Qattiq va suyuq yoqilg‘ilar katta miqdordagi murakkab birikma-lardan tashkil topgan bo‘lib, ularning molekulyar tuzilishi va minerologik tarkibi xali kerakli darajada o‘rganilmagan.

Bu yoqilg‘ilarning tarkibida namlik va mineral jinslar bo‘lib, yoqilg‘i yonganida ular kul hosil qiladi. qattiq va suyuq yoqilg‘ilarning kimyoviy tahlili uning massasidagi uglerod S, vodorod N, kislorod O, azot N, oltingugurt S kabi elementlarning va shuningdek kul A va namlik W larning qancha foizda ekanligini aniqlash imkonini beradi. Iste'molchiga to‘g‘ridan-to‘g‘ri keltirilgan birlamchi ko‘rinishdagi yoqilg‘i ishchi yoqilg‘i va uning massasi ishchi massasi deb ataladi. Yuqorida foizlarda keltirilgan elementlarning yoqilg‘i ishchi massasiga nisbatan ifodalanishi yoqilg‘i ishchi massasining elementar tarkibi deb ataladi.

$$C^I + H^I + O^I + N^I + S^I{}_{OR+K} + A^I + W^I = 100\% \qquad (12.1)$$

(12.1) ifodadagi indeks – I – elementar tarkib elementining ishchi massasiga tegishli ekanligini bildiradi.

Yuqorida keltirilgan yoqilg‘i ishchi massasining elementar tarkibiga oltingugurt kiradi va u qattiq yoqilg‘ilarda uch xil ko‘rinishda uchraydi: organik S_{OR}, kolchedanli S_K va sulfatli S. Organik oltingugurt yoqilg‘ining yuqori molikulyar organik birikmalari tarkibiga kiradi. Kolchedanli oltingugurt metallarning sulfidi bo‘ladi (odatda temir kolchedan FeS). Yoqilg‘i yonganida tarkibidagi organik va kolchedanli oltingugurt issiqlik chiqarib oksidlanadi. Sulfatli oltingugurt yoqilg‘ilarda sulfatlar ko‘rinishida uchraydi, masalan, CaSO, MgSO va boshqalar. Bu birikmalar yonganda deyarli parchalanmaydi va kul ko‘rinishga o‘tadi. Suyuq yoqilg‘ilarda oltingugurt oltingugurtli organik birikmalar, elementar oltingugurt va oltingugurtli vodorod N_2S ko‘rinishda bo‘ladi.



12.2–rasm. Yoqilg‘ining hisobiy massasi va uning tarkibi

Yoqilg‘ining qanday sharoitda olinishi, transportirovka qilinishi va saqlanishiga qarab tarkibidagi qo‘shimchalar va namlik darajasi keng oraliqda o‘zgarishi mumkin. Shu sababli ham turli navli qattiq yoqilg‘ilarning issiqlik-texnikaviy tavsiflarini nisbiy baholashda analitik, quruq, kulsiz quruq (yonuvchi) kabi shartli tushunchalar qabul qilingan va shuningdek, suyuq yoqilg‘ining organik massasi ishchi va quruq massalarga shartli bo‘linadi (12.2 – rasm).

Laboratoriya sharoitida yoqilg‘ini tahlil qilish uchun yoqilg‘ining ma'lum kichik qismi laboratoriya xonasida tabiiy sharoitda to barcha massasi xona harorati va namligi darajasigacha etguncha quritiladi. Analitik quruq yoqilg‘i massasining elementar tarkibi quyidagi ko‘rinishda yoziladi

$$C^{A} + H^{A} + O^{A} + N^{A} + S^{A}_{or+\kappa} + A^{A} + W^{A} = 100\% \qquad (12.2)$$

Haroratning t≥105°C qiymatida yoqilg‘i sun'iy quritilib tarkibidagi namlik yo‘qotiladi va yoqilg‘ining quruq massasi olinadi

$$C^{K} + H^{K} + O^{K} + N^{K} + S^{K}_{or+\kappa} + A^{K} = 100\% \qquad (12.3)$$

Suvsiz va kulsiz yoqilg‘i elementar kimyoviy tarkibli quruq kulsiz (yonuvchi) massa bilan xarakterlanadi,

$$C^{Yo} + H^{Yo} + O^{Yo} + N^{Yo} + S^{Yo}_{or+\kappa} = 100\% \qquad (12.4)$$

Yoqilg‘ining yonuvchi massasi tushunchasi shartli bo‘lib, chunki uning tarkibiga yoqilg‘ining yonuvchi elementlari bilan azot va kislorod birikkan holatda bo‘ladi. Yoqilg‘ining yonuvchi massasi elementar tarkibidan kolchedan oltingugurtini chiqarib tashlash yoqil-g‘i massasining organik tarkibini hosil qilishga olib keladi

$$C^{O} + H^{O} + O^{O} + N^{O} + S^{O}_{Or} = 100\% \qquad (12.5)$$

Uncha murakkab bo‘lmagan hisob-kitoblar asosida yoqilg‘ining elementar tarkibini qayta hisoblab, bir massadan boshqa turdagi massaga o‘tkazish mumkin, chunki ularning bog‘lanishlar sodda proportsional ko‘rinishga ega. Masalan,

$$C^{K} = C^{I}\frac{100}{100 - W^{I}}, \quad \% \qquad H^{K} = H^{I}\frac{100}{100 - W^{И}}, \quad \% \qquad (12.6)$$

Berilgan A_1^I va W_1^I uchun aniq bir yoqilg‘ining ishchi massasi tarkibi ma'lum bo‘lsa, u holda iste'molchiga uzatilganidan so‘ng bu yoqilg‘ining kullik va namlik ko‘rsatkichlari o‘zgargan qiymatda bo‘ladi (A_2^I va W_2^I) va yoqilg‘i tarkibini qayta hisoblash quyidagi ifodalar bilan amalga oshiriladi

$$C^K = C^I \frac{100 - A_2^I - W_2^I}{100 - A_1^I - W_1^I}, \qquad H^K = H^I \frac{100 - A_2^I - W_2^I}{100 - A_1^I - W_1^I}$$

Hisob-kitoblarning to‘g‘riligi quyidagi tenglikning bajarilishi bilan tekshiriladi

$$C_2^I + H_2^{\ I} + O_2^{\ I} + N_2^{\ I} + S_{(Or+K)}^I + A_2^{\ I} + W_2^{\ I} = 100\% \qquad (12.7)$$

Ikki qattiq yoki suyuq yoqilg‘i aralashmasi yoki suyuq va qattiq yoqilg‘ilarning aralashmalari uchun berilgan massalarining ulushlari m_1 va $m_2 = 1 - m_1$ asosida aralashmalarning ishchi (yoki har qanday boshqa) massalari elementar tarkibi siljish ifodasi bo‘yicha aniqlanadi. Masalan,

$$C_{AR}^I = C_1^I m_1 + C_1^I (1 - m_1), \qquad H_{AR}^I = H_1^I m_1 + H_2^I (1 - m_1),$$

bu yerda $C_1^I, C_2^I, C_{AR}^I, H_1^I, H_2^I, H_{AR}^I$ – mos ravishda birinchi va ikkinchi yoqilg‘ilarning va yoqilg‘i aralashmasining tarkibida uglerod, vodorod va boshqa elementlarning foizlardagi salmog‘i, %.

Qattiq yoki suyuq yoqilg‘ining issiqlik energiyasi manbai sifatidagi ko‘rsatkichi uning elementar tarkibiga ko‘proq bog‘liq. Bu yoqilg‘ilarning asosiy yonuvchi elementi bu ugleroddir. Uglerodning to‘liq yonishida ajraladigan solishtirma issiqlik miqdori 34,4 MJ/kg ni tashkil etadi, yoqilg‘i aralashmasidagi ulushi birmuncha ko‘pligi hisobiga (yog‘ochda 50% gacha, antratsitda esa 95% gacha) yoqilg‘ining umumiy issiqlik chiqarishdagi uning ulushi ham shunga yarasha yuqoridir. Yoqilg‘ining yonuvchi komponentlari orasida vodorod ugleroddan keyin ikkinchi bo‘lib, uning yonishi natijasida hosil bo‘ladigan solishtirma issiqli miqdori 119 MJ/kg ni tashkil etadi. qattiq va suyuq yoqilg‘ilarning yonuvchi massalaridagi vodorodning foiz ulushi 2% dan (antratsit) 10,5% gacha (mazut) bo‘ladi. Kislorod bilan azot yoqilg‘ilarning yonuvchi massalari tarkibining eng noaktiv elementlaridir, chunki bu elementlarning bo‘lishi yoqilg‘i tarkibidagi asosiy yonuvchi elementlar bo‘lgan uglerod va vodorodning kamayishiga olib keladi. Yoqilg‘ining organik massasida kislorodning bo‘lishi bir qism uglnrod va vodorodning oksidlangan ekanligini bildiradi va bu esa yoqilg‘ining issiqlik hosil qilish xususiyatini pasaytiradi. Yoqilg‘ining geologik yoshi oshib borishi bilan yoqilg‘ida kislorod miqdori kamayib bordi. Yoqilg‘i yonishi davomida yonuvchi massasidagi azot gazsimon yonish mahsulotiga aylanadi. Ba'zida kislorod va azot yoqilg‘ining ichki yoki tashkiliy ballasti ham deb

yuritiladi. Qattiq va suyuq yoqilg‘ilarning tarkibiga kiruvchi yonuvchi oltingugurt (organik va kolchedan) yoqilg‘ining yonishi vaqtida oltingugurt gazi SO_2 ni hosil qilgan holda oksidlanadi. Bunda ajralib chiqayotgan solishtirma issiqlik miqdori 9,3 MJ/kg bo‘lib, vodorod yoki uglerodning yonishida hosil bo‘ladigan solishtirma issiqlik miqdoridan ancha kichikdir. Oltingugurtning juda oz qismi yonishi vaqtida oltingugurt angidrid SO_3 hosil qiladi, ammo u texnik hisob-kitoblarda hisobga olinmaydi. Yoqilg‘i tarkibida oltingugurtning bo‘lishi, yonuvchi massasidagi uglerod va vodorodning kamayishiga olib keladi va bu o‘z navbatida yoqilg‘i yonish issiqligining kamayishiga sabab bo‘ladi. Bundan tashqari oltingugurt oksidi issiqlik ishlatiladigan qurilmalar metall elementlarining korroziyasini yuzaga keltiradi va bu elementlar orasidagi issiqlik uzatishga salbiy ta'sir qiladi. qattiq va suyuq yoqilg‘ilardagi oltingugurtning ulushi 0,5% dan 7% gacha oraliqda bo‘ladi (yonuvchi slanetslarda 15% gacha). Kul va namlik yoqilg‘i tarkibidagi nozarur komponent bo‘lib, uning tashqi ballasti hisoblanadi.

Yoqilg‘ining ishchi massasida kul va namlik miqdorining ko‘payib ketishi yoqilg‘i qismining kamayishiga olib keladi va bu esa yoqilg‘i massasining issiqlik chiqarish birligining kamayishiga sabab bo‘ladi. Nam yoqilg‘ini yoqish vaqtida issiqlikning ma'lum bir qismi namlikni qochirishga va suv bo‘g‘larini qizdirishga sarf bo‘ladi va bu ajralib chiqayotgan issiqlik qiymatining hamda mos ravishda yonish haroratini kamayishiga olib keladi. Gazsimon yoqilg‘i (tabiiy yoki sun'iy) yonuvchi va yonmaydigan individual gazlarning hamda suv bug‘larining fizik aralashmasidan iborat bo‘ladi.

12.1 – jadval

Yoqilg‘i tarkibini bir massadan ikkinchisiga hisoblab o‘tkazish ko‘phadlari

Yoqilg‘ining ilk massasi	Yoqilg‘ining aniqlanadigan massasi				
	Ishchi	Analitik	quruq	Kulsiz quruq (yonuvchi)	Organik
Ishchi	1	$\frac{100-W^{A}}{100-W^{И}}$	$\frac{100}{100-W^{И}}$	$\frac{100}{100-\left(A^{И}-W^{И}\right)}$	$\frac{100}{100-(S_{OP+K}^{И}+A^{И}+W^{И})}$
Analitik	$\frac{100-W^{И}}{100-W^{A}}$	1	$\frac{100}{100-W^{A}}$	$\frac{100}{100-\left(A^{A}-W^{A}\right)}$	$\frac{100}{100-(S_{OP+K}^{A}+A^{A}+W^{A})}$
quruq	$\frac{100-W^{И}}{100}$	$\frac{100-W^{A}}{100}$	1	$\frac{100}{100-A^{K}}$	$\frac{100}{100-(S_{OP+K}^{K}+A^{K})}$
Kulsiz quruq (yonuvchi)	$\frac{100-(A^{И}+W^{И})}{100}$	$\frac{100-(A^{A}+W^{A})}{100}$	$\frac{100-A^{K}}{100}$	1	$\frac{100}{100-(S_{OP+K}^{Ё})}$
Organik	$\frac{100(S^{И}_{OP+K}+A^{И}+W^{И})}{100}$	$\frac{100-(S^{A}_{OP+K}+A^{A}+W^{A})}{100}$	$\frac{100-(S^{K}_{OP+K}+A^{K})}{100}$	$\frac{100-S^{Ё}_{OP+K}}{100}$	1

Individual yonuvchi gazlarga uglerod oksidi SO, vodorod N_2, metan SN_4, oltingugurtli vodorod H_2S, turli cheklangan va cheklanmagan uglevodorodlar S_mN_n kiradi. Yonmaydigan gazlarga uglerodning ikki oksidi SO_2, oltingugurtli gaz SO_2, azot N_2, kislorodO_2 kiradi.

Gazsimon yoqilg‘ining tarkibiy tuzilishi tashkil etuvchi gazlarning foizli ulushi bilan aniqlanadi va umumiy holda quruq yoqilg‘i uchun quyidagicha ifodalanadi

$$SO + N_2 + SN_4 + \Sigma S_mN_n + H_2S + SO_2 + N_2 + O_2 = 100\% \quad (12.8)$$

Gazsimon yoqilg‘ining namligi dt, 1m^3 hajmdagi normal holatga keltirilgan, ya'ni harorati 273 °K (0°C) va bosimi 0,1013 MPa (760 mm.simob ustuni) quruq gazda mavjud bo‘lgan suv bug‘larining miqdori bilan aniqlanadi.

Gazsimon yoqilg‘i tarkibida boshqa qo‘shimchalarning bo‘lishi (ko‘mir va minerallarning kukuni, smolaning bug‘i va h.k.) va ularning ulushi, suv bug‘larning ulushi qanday ifodalansa xuddi shunday ifodalanadi. Ba'zi hollarda yoqilg‘idan foydalaniladigan qurilmalarda gazsimon yoqilg‘ilarning aralashmalari (koks va domna pechlari gazi, tabiiy va koks gazi va h.k.) yoqiladi.

Ikki gazsimon yoqilg‘i aralashmalari tarkibi, berilgan hajmiy foizli ulushlari nva n_2=1-n_1 bo‘yicha, qattiq yoqilg‘ilar aralashmaniki kabi siljitish ifodalari bilan aniqlanadi. Masalan,

$$SN_{4AR}=n_1CH_4'+(1-n_1)CH_4''$$

$$N_{2AR}=n_1CH_2'+(1-n_1)H_2'',$$

bu yerda - CH_4', CH_4'', SN_{4SM}, N_{2SM}, CH_2', H_2'' – mos ravishda birinchi va ikkinchi gazsimon yoqilg‘ilardagi hamda ularning aralashmalaridagi metan, vodorod konttsentratsiyalari, %.

11.2. Yoqilg‘ining kulligi va namligi

Kul yoqilg‘ining to‘liq yonishi natijasida hosil bo‘ladigan mineral qoldiq. Kulning hosil bo‘lishiga asosiy sabab, bu yoqilg‘i tarkibida mineral qo‘shimchalarning bo‘lishidir. Kullar tabiatiga ko‘ra birlamchi, ikkilamchi va uchchilamchi turlarga bo‘linadi. Birlamchi kullar yoqilg‘i hosil qiluvchi moddalar tarkibiga kiruvchi minerallardan hosil bo‘ladi; ikkilamchi kullar yoqilg‘i hosil bo‘lishi jarayonida yoqilg‘iga qo‘shilib qolgan mineral qo‘shimchalardan hosil bo‘ladi va uchchilamchi kullar esa yoqilg‘ini qazib olish jarayonida qo‘shilib qolgan mineral qo‘shimchalardan hosil bo‘ladi. Bunday qo‘shimchalarga

sulfatlar, karbonatlar, silikatlar, fosfatlar, xloridlar, piritlar va boshqa birikmalar kiradi. Kul tarkibiga Al_2O_3, , Na_2O, K_2O, SiO_2, FeO va shu kabi oksidlar ham kiradi.

Qattiq yoqilg‘ilarda mineral qo‘shimchalarning salmog‘i keng oraliqda o‘zgaradi: yog‘och yoqilg‘ilarda 1-2%, yonuvchi slanetslarda 70% gacha, ko‘mirda 10-40%, suyuq yoqilg‘ilarda esa 1% dan oshmaydi.

Laboratoriya sharoitida yoqilg‘ining kullik darajasini aniqlash uchun oldindan quritib olingan namuna yoqiladi va olingan qoldiq platinadan tayyorlangan tigelda o‘zgarmas massaga kelgunga qadar 500°S gacha (mazut uchun) yoki 850 °C gacha qizdiriladi (qattiq yoqilg‘i uchun). Yonmay qolgan qoldiqni tortish natijasida ilk yoqilg‘i tarkibidagi kul miqdori aniqlanadi.

Yoqilg‘ining yonishi jarayonida mineral qoldiqlar qattiq holatdan suyuq holatga o‘tishi va shlak deb ataluvchi mineral eritmalarni yuzaga keltirishi mumkin. Kullarning asosiy tavsiflaridan biri uning eruvchanligidir. Laboratoriya sharoitida kulning eruvchanligini aniqlash uchun kul elektr pech ichida chala tiklanuvchan gazli muhit (SO-60%, SO-40%) yuzaga keltiriladi va tadqiqot qilinishi kerak bo‘lgan kulning maydalangan standart o‘lchamdagi piramidachalari pech ichiga solinib qizdiriladi. Piramidachalar yoki ularning uchlari egilishi boshlanishini yuzaga keltiruvchi harorat t_1 kulning dnformatsiyalanishi boshlanishi harorati deb ataladi. Piramidachalar uchlarining asosiga qadar egilishini yuzaga keltiruvchi harorat t_2 kulning erishi boshlanishi harorati deb ataladi. Piramidachalarning erib taklik yuzasiga oqib tushishini belgilovchi haroratt kulning suyuq holatga o‘tishi boshlanishi harorati bo‘ladi. Qattiq yoqilg‘i kullari eruvchanligi tavsifi bo‘yicha uch guruhga bo‘linadi: engil eruvchi kullar ($t_k \leq 1350$ °C), o‘rtacha eruvchi kullar (t_k =1350-1450°C) va qiyin eruvchi kullar (t_k=1350-1450°C).

Yoqilg‘i tarkibida kulning ko‘p miqdorda bo‘lishi, hosil bo‘ladigan shlaklarni chiqarib tashlash hamda gaz tozalagichlar uchun qo‘shimcha sarflarning ko‘payishi va shuningdek shlak va kullarda issiqlik isroflarining oshishi hisobiga yoqilg‘i ishlatiladigan qurilmalarning texnik-iqtisodiy ko‘rsatkich-larini kamayishiga olib keladi.

Qattiq yoqilg‘ilarning namligini tashqi va ichki namliklarga ajratish qabul qilingan. Tashqi namliklarga ochiq havzadagi va er ostidagi suvlar, atmosfera havosining namligi, yoqilg‘ini qazib olishda,

transportirovka qilishda va saqlash davomida uning yuzasini namlaydi, mayda kapillyarlari hamda tirqichlar orqali ichkarisiga kirib boradi va ayniqsa torf va qo‘ng‘ir ko‘mirlarning namlanishida katta rol o‘ynaydi. Yoqilg‘i yuzasi o‘lchamlarining kichrayib borishi namlik solishtirma qiymatining shiddatli oshishiga olib keladi va natijada yoqilg‘ida namlik qiymati oshadi. Tashqi namlikni yoqilg‘ini quritish bilan yo‘qotish mumkin.

Yoqilg‘ining ichki namligiga kolloidli va gidratli (kristallgidratli) namlik kiradi. Kolloidli namlik yoqilg‘ining massasi bo‘ylab bir tekis taqsimlangan bo‘ladi va uning miqdori yoqilg‘ining kimyoviy tabiati va tarkibiga bog‘liq. Yoqilg‘ining geologik yoshi oshib borishi bilan kolloidlik namlik sezilarli darajada kamayib boradi. Gidratli namlikning miqdori yoqilg‘ining mineral qismi kimyoviy birikmalari tarkibiga (asosan sulfat kaltsiy) kiradi. Gidratli namlik miqdori yoqilg‘i tarkibida nisbatan uncha ko‘p bo‘lmasa ham uni yo‘qotish uchun yoqilg‘ini yuqori haroratgacha qizdirish kerak bo‘ladi.

O‘ta namlikka ega bo‘lgan yoqilg‘ini ochiq havoda saqlash vaqtida namligining bir qismini yo‘qotiladi, quritilgan yoqilg‘ini ochiq havoda saqlash vaqtida esa bu yoqilg‘i qo‘shimcha namlikni havodan tortib ola boshlaydi va bu jarayon yoqilg‘i yuzasidagi to‘yingan suv bo‘g‘i bosimi yoqilg‘i yuzasiga berilayotgan atmosfera nam havosi bosimi bilan tenglanguncha davom etadi. Tabiiy sharoitlardagi yoqilg‘ining turg‘un namligi. uning quruq-havoli namligi deyiladi. Yoqilg‘i namligining oshishi yoqilg‘i yonish issiqligining kamayishiga, yonish mahsuloti hajmining oshishiga va natijada yonish haroratini kamayishiga olib keladi. Pirovardida yoqilg‘idan foydalanish qurilmasining foydali ish koeffitsiyenti pasayadi, yoqilg‘ining solishtirma sarfi oshadi (ishlab chiqariladigan mahsulot birligiga to‘g‘ri keladigan). Yoqilg‘i namligining oshishi uning sochiluvchanligini yomonlashtiradi, qish vaqtida esa yoqilg‘ining muzlashiga olib keladi va bu esa uning trasportirovaka qilish va foydalanishni juda qiyinlashtiradi.

11.3. Yoqilg‘i yonishi issiqligi

Yoqilg‘i yonish issiqligi, yoqilg‘i massa birligining (gazsimon yoqilg‘ilar uchun hajmiy) to‘liq yonishida hosil bo‘ladigan issiqlik miqdori bo‘lib, u MJ/kg yoki MJ/m^3 larda o‘lchanadi. Yoqilg‘ilarning yonishida, qattiq va suyuq yoqilg‘ilar tarkibidagi yonuvchi kompo-

nentlarning oksidlanishi (uglerod, vodorod va oltingugurtlarning) yoki gazsimon yoqilg‘ilarning tarkibidagi yonuvchi gazlarning (uglerod oksidi, vodorod, metan va boshqa uglevodorod, oltingugurtli vodorodlarning) oksidlanishi ekzotermik reaktsiya bo‘lgani sababli issiqlik ajralib chiqadi

Yoqilg‘i yonish issiqligi ishchi, analitik, quruq, yonuvchi yoki organik massalarga ta'luqli bo‘lishi mumkin va u mos ravishda quyidagicha belgilanadi: Q^I, Q^A, Q^K, Q^{Yo} va Q^O. Texnik hisob-kitoblarda yonish issiqligi qiymati yoqilg‘ining ishchi massasiga nisbatan olingan qiymatlari foydalaniladi.

Qattiq va suyuq yoqilg‘ilarning yonuvchi elementlari juda xilma-xil va murakkab kimyoviy birikmalardan tashkil topgan bo‘lgani sababli ham uning barcha jihatlarini hisobga olishning iloji yo‘q. Shuning uchun ham bu yoqilg‘ilarning yonish issiqliklarini aniq hisoblash mumkin emas. Bu yoqilg‘ilarning yonish issiqliklari kalorimetrik usulda tajriba asosida aniqlanadi, bu usulning asosini maxsus idish (kalorimetrik bomba) tashkil etib, bu idish kislorod bilan to‘ldirilgan bo‘ladi va yoqilg‘i shu muhitda yoqiladi hamda suv kalorimetri yordamida ajralib chiqayotgan issiqlik miqdori o‘lchanadi. o‘lchashlar natijasida yoqilg‘ining yonishida hosil bo‘lgan issiqlik hisoblanadi va bu issiqlik kalorimetrik bomba bo‘yicha yonish issiqligi QB deb ataladi.

Yoqilg‘ining to‘liq yonishida ajralib chiqadigan issiqlik miqdori yonuvchi mahsulot tarkibida namlikning qanday agregat holatida (yoqilg‘i yonishi natijasida ajralib chiqayotganligiga va vodorodning yonishi natijasida hosil bo‘lishiga) bo‘lishiga, ya'ni bug‘ ko‘rinishida yoki suyuqlik ko‘rinishida bo‘lishiga bog‘liq. Agar yonuvchi mahsulotlardagi barcha suv bug‘lari kondensatsiyalansa va suyuq holatga o‘tsa (gazlarning harorati suv bug‘i haroratining shudringlanish nuqtasidan past bo‘lganda), u holda yonish issiqligi oliy Q_{Ol} deyiladi. Agar suv bug‘larining kondensiyalanishi sodir bo‘lmasa, u holda yonish issiqligi past Q_P deyiladi. Yuqori va past yonish issiqliklarining farqi, yoqilg‘ining yonuvchi mahsulotlari tarkibidagi suv bug‘larining kondensatsiyalash issiqligini beradi.

Oliy va past yonish issiqlik qiymatlari orasidagi o‘zaro analitik bog‘lanish quyidagicha ifodalanadi:

$$Q_{Ol} = Q_P + r_b \cdot G_{N2O}\,, \qquad (12.9)$$

bu yerda G–bir kilogramm yonuvchi mahsulot tarkibidagi namlikning massasi, kg; r_b–suv bug‘ining bug‘ o‘zgartirishdagi (kondensatsiyalanishi) solishtirma issiqligi 2,51 MJ/kg ga teng deb qabul qilingan.

1 kg qattiq yoki suyuq yoqilg‘ini yoqishda hosil bo‘ladigan G_{N2O} ning solishtirma qiymati, kg/kg

$$G_{N2O} = 0{,}01\,(9N^I + W^I), \qquad (12.10)$$

gazsimon yoqilg‘ini yoqqanda esa, kg/m^3,

$$G_{N2O}=0{,}00804\,(N_2 + 2SN_4 + \ n/2\ \Sigma S_mN_n + N_2S), \qquad (12.11)$$

bu yerda H^I va W^I –yoqilg‘i ishchi massasidagi vodorod va namlikning foizli ulushi, *% ;*

N_2, SN_4, S_mN_n, N_2S – gazsimon yoqilg‘i tarkibidagi mos gazlarning kontsentratsiyasi, %.

Yonish issiqligining kalorimetrik usul bilan tajriba asosida aniqlangan qiymati QB, suv bug‘larining kondensatsiyalash shartlari bo‘yicha, yonuvchi mahsulotlar tarkibidagi suv bug‘ilarining qiymatini hisobga olingan bo‘lsa ham uning qiymati QV qiymati bilan to‘g‘ri kelmaydi, chunki yoqilg‘ining kalorimetrik bomba ichida kislorodli muhitda yonishi vaqtida qo‘shimcha ekzometrik reaktsiyalar yuz berib, real sharoitda yoqilg‘ining yonishida sodir bo‘lmaydigan oltingugurt va azot kislotalari hosil bo‘ladi. Shuning uchun bir xil yoqilg‘ini yoqqanimizda QB ning qiymati QV dan katta bo‘ladi va ular o‘rtasidagi farq yuqorida keltirilgan kislotalarning hosil bo‘lishi bilan izohlanadi.

Q_V va Q_B qiymatlar orasidagi farq quyidagi ifoda bilan ifodalanadi

$$Q_V= Q_B - 9{,}42\cdot 10^{-2}\cdot S^I_{OR+K} - k\cdot Q_B, \qquad (12.12)$$

bu yerda $9{,}42\cdot 10^{-2} S^I_{OR+K}$ – oltingugurt kislotasi hosil bo‘lishida yuzaga keladigan issiqlik, MJ/kg; kQ_B – azot kislotasi hosil bo‘lishida yuzaga keladigan issiqlik, MJ/kg; k - koeffitsiyenti boyitilmagan (tohix) ko‘mirlar, antratsitlar va suyuq yoqilg‘ilar uchun 0,001 deb va qolgan barcha ko‘mirlar, yonuvchi slanetslar va torflar uchun esa 0,0015 deb qabul qilingan.

Yonuvchi slanetslar uchun Q^I_V ni hisoblashda, yoqilg‘i yonish issiqligining qo‘shimcha ma'lum bir qismi, ya'ni mineralli qismidan karbonatlar ajralib chiqishiga sarf bo‘ladigan issiqlik hisobga olinadi.

Yonuvchi slanetslar (va boshqa tarkibida 2% dan ko‘p karbonat bo‘lgan yoqilg‘ilarni) issiqligini hisoblash ifodasi, MJ/kg,

$Q^I_V = Q_B$ - $(9{,}42 \cdot 10^{-3} \cdot S^I_{I+K} + k \cdot Q_B) - 40{,}6 \cdot 10^{-3} (CO_2)_K$, (12.13)

bu yerda $40{,}6 \cdot 10^{-3}$ $(CO_2)_k$ – karbonatlarning ajralishida hosil bo‘ladigan issiqlik, MJ/kg;

$(SO_2)_K$ - yoqilg‘i tarkibida karbonatlar SO_2 ning foizli ulushi, % .

Real sharoitlarda yoqilg‘idan foydalaniladigan qurilmalarda, ko‘pgina hollarda yoqilg‘i yonganidan so‘ng hosil bo‘ladigan mahsulotlari, tarkibidagi suv bug‘larining shudringlanish harorati nuqtasidan bir muncha yuqori bo‘lgan haroratda, atmosferaga chiqib ketadi. Bu holda suv bug‘larining kondensatsiyalashdagi issiqligidan foydalanilmaydi va u issiqlik hisob-kitoblarga kiritilmaydi. Shu sababli ham texnik hisob-kitoblarda Q^I_N ning qiymatigina hisobga olinadi.

Yoqilg‘ining aniq bir turi uchun Q^I_P bilan past yonish issiqlik qiymatlarining quruq Q^K_P va Q_{Yon} yonuvchi massalari bilan o‘zaro bog‘liqligi quyidagi ifodalar bilan ifodalanadi, MJ/kg,

$$Q^I_P = Q^K_P \frac{100 - W^I}{100} - 0{,}01251 W^I,$$
$$Q^K_P = Q^{Yo}_P \frac{100 - A^I - W^I}{100} - 0{,}01251 W^I \qquad (12.14)$$

Yoqilg‘ining aniq bir turi uchun ishchi massasidagi kul va namlik-ning o‘zgarishi natijasida yonish issiqligi qiymatiining o‘zgargan yangi qiymati quyidagi ifoda bilan aniqlanadi, MJ/kg

$$Q^I_{P2} = (Q^I_{P1} + 0{,}01251 W^I_1) \frac{100 - A^I_2 - W^I_2}{100 - A^I_1 - W^I_1} - 0{,}01251 W^I_2, \qquad (12.15)$$

bu yerda Q^I – A^I, W^I qiymatlaridagi yoqilg‘i ishchi massasining yonish issiqligi, MJ/kg; A^I_2 va W^I_2 –yoqilg‘ining mos kullik va namliklarining yangi qiymatlari, %.

(12.15) ifoda quyidagi mulohazalar asosida hosil qilindi. Ballast tarkibi turlicha bo‘lgan bir turdagi yoqilg‘i uchun quyidagi ifoda o‘rinlidir:

$$Q^I_{P1} = Q^{Yo}_P \frac{100 - A^m_1 - W^I}{100} - 0{,}01251 W^m_1$$

$$Q^K_{P2} = Q^{Yo}_P \frac{100 - A^I_2 - W^m_2}{100} - 0{,}01251 W^m_2$$

yoki

$$Q^I_{P1} + 0{,}01251 W^m_1 = Q^{Yo}_P \frac{100 - A^m_1 - W^I}{100}$$

$$Q^K_{P2} + 0{,}01251 W^m_2 = Q^{Yo}_P \frac{100 - A^I_2 - W^m_2}{100}$$

Agar bu tenglamalarining chap va o‘ng tomonlari nisbatini olib hamda Q^{Yo}_{N} ning har ikki yoqilg‘i uchun o‘zgarmas qiymatda bo‘lishini hisobga oladigan bo‘lsak, u holda (12.13) ifoda osonlik bilan hosil bo‘ladi.

Qattiq yoki suyuq yoqilg‘i uchun uning yonish issiqligi bo‘yicha tajribaviy qiymatlari bo‘lmagan holda bu qiymatni taqribiy hisoblash uchun Mendeleevning empirik ifodasidan foydalanish mumkin, MJ/kg,

$$Q_P^I = 0{,}33C^I - 1{,}03H^I - 0{,}109(O^I - S_{OR+K}^I) - 0{,}01251W^I \qquad (12.16)$$

Quruq gazsimon yoqilg‘ining past yonish issiqligi, tarkibiga kiruvchi alohida yonuvchi gazlarning kontsentratsiyasini hisobga olgan holda har birining yonish issiqliklari yig‘indisi sifatida analitik hisoblanadi, MJ/m^3,

$$Q_P^K = 0{,}01\left(Q_{CH4}\cdot CH_4 + Q_{CO}\cdot CO + Q_{H2}\cdot H_2 + \sum Q_{C_mH_n}\cdot C_mH_n + Q_{H_2S}\cdot H_2S\right), \qquad (12.17)$$

bu yerda $Q_{CH_4}, Q_{H2}, Q_{CO}, Q_{C_mH_n}, Q_{H_2S}$ – mos gazlarning past yonish issiqliklari, MJ/m^3; CN_4, SO, ON, C_mH_n, N_2S – quruq gazsimon yoqilg‘idagi mos gazlarning foiz ulushlari, %. $Q^{Ñ}_{Â}$ ni hisoblash ifodasi ham shunday tarkibiga ega bo‘ladi.

Ikki qattiq yoqilg‘i yoki qattiq (suyuq) yoqilg‘ilarning shartli aralashmasining yonish issiqligi, aralashmalar tarkibidagi ularning massali foizli ulushlarini hisobga olgan holda yonish issiqliklarining yig‘indisi tarzida hisoblanadi, MJ/kg,

$$Q_{PAp}^I = m_1 Q_{P1}^I + \left(1 - m_2\right) Q_{P2}^I, \qquad (12.18)$$

bu yerda m_1 – birinchi yoqilg‘ining aralashma massasidagi ulushi; Q^I_{P1} va Q^I_{P2}–birinchi va ikkinchi yoqilg‘ilarning yonish issiqligi, MJ/kg.

Agar yoqilg‘i aralashmasidagi har bir tashkil etuvchisi issiqlik ajralishi bo‘yicha q_1 va q_2=I-q_1 ulushlarda berilgan bo‘lsa (yoqilg‘i aralashmasining birinchi va ikkinchi tashkil etuvchilarining yig‘indi issiqlik ajralashmasidagi ulushi), u holda massali ulushga o‘tkazishda quyidagi ifodadan foydalaniladi

$$m_1 = \frac{q_1 Q_{P2}^I}{q_1 Q_{P2}^I + \left(1 - q_1\right) Q_{P1}^I}\ , \qquad (12.19)$$

(12.19) ifoda quyidagilar asosida hosil qilingan. Aralashma yig‘indi issiqlik ajralishidagi birinchi yoqilg‘ining ulushi quyidagicha ifodalanadi:

$$q_1 = {m_1 Q_{P1}^I}/{Q_{PAr}^I}$$

bu yerda Q_{PAr}^I–aralashmaning yonish issiqligi, MJ/kg. (12.18) ni hisobga oladigan bo‘lsak

$$q_1 = \frac{m_1 Q_{P1}^I}{m_1 Q_{P1}^I + (1 - m_1) Q_{P2}^I},$$

u holda tenglamani m_1 ga nisbatan echganimizda (12.19) ifodani hosil qilamiz.

Agar ikki tashkil etuvchidan iborat bo‘lgan gazsimon yoqilg‘i tarkibining umumiy issiqlik ajralishidagi bir gazning issiqlik ajralishi bo‘yicha ulushi berilgan bo‘lsa, u holda xuddi shunday ifodalar yordamida ularning hajmiy ulushlari orasidagi bog‘lanishlari aniqlanadi. qattiy (suyuq) yoqilg‘ining gazsimon yoqilg‘i bilan birga yoqilishini hisoblashda, 1 kg qattiq (suyuq) yoqilg‘iga to‘g‘ri keladigan gazsimon yoqilg‘ining solishtirma hajmi (m^3/kg) hisobga olingan holda amalga oshiriladi. Bunda aralashmaning shartli yonish issiqligi hisoblanadi, MJ/kg

$$Q_{PAr}^V = Q_P^I + x Q_P^K, \qquad (12.20)$$

bu yerda Q^I_P va Q^I_P –mos ravishda qattiq (suyuq) yoqilg‘ining yonish issiqligi, MJ/kg, va gazsimon yoqilg‘ining yonish issiqligi MJ/m^3; *x* – 1 kg qattiq (suyuq) yoqilg‘iga to‘g‘ri keladigan gazsimon yoqilg‘ining miqdori, m^3.

Turli yoqilg‘ilarning yonish issiqliklari turlicha qiymatlarga ega bo‘ladi. Yoqilg‘ilarni o‘zaro solishtirishda va zarur bo‘lgan issiqlik miqdorini hisoblashda shartli yoqilg‘i tushunchasidan foydalaniladi.

Shartli yoqilg‘ining yonish issiqligi deb Q_{ShRT}=29,33 MJ/kg qiymat qabul qilingan. Real yoqilg‘i sarfini shartli yoqilg‘i sarfiga quyidagi ifoda bilan keltiriladi

$$B_{ShRT} = {B Q_P^R}/{Q_{ShRT}}, \qquad (12.21)$$

bu yerda V – yonish issiqligi Q^I_P bo‘lgan real yoqilg‘i sarfi.

Q^I_P/Q_{ShRT} nisbat yoqilg‘ining E issiqlik ekvivalenti deb ataladi, ya'ni B_{ShRT}=V·E.

Yoqilg‘ining yonish issiqligiga uning namligi va kulligining ta'siri katta ekanligini hisobga olgan holda, turli ko‘rinishdagi organik yoqilg‘ilarning yonish issiqliklarini nisbiy baholashda namlik va kulliklarining keltirilgan tavsiflari W^{II} va A_1^{II} dan ham foydalaniladi va

bu tavsiflar quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$W^{II} = W /Q^{I}_{P};\ A^{II} = A^{I}/Q^{I}_{II}\ , (\%, kg)\ MJ. \qquad (12.22)$$

Keltirilgan A^{II} va W^{II} tavsiflar turli yoqilg‘ilarni taqqoslanuvchi birliklarda solishtirish imkonini beradi. $W^{II}<0{,}7$ (%·kg)/MJ bo‘lgan yoqilg‘i kam namlikdagi yoqilg‘i, $0{,}7<W^{II}<1{,}89$ bo‘lgan yoqilg‘i o‘rta namlikdagi yoqilg‘i va $W^{II}>1{,}89$ bo‘lgan yoqilg‘i esa yuqori namlikdagi yoqilg‘i deb ataladi. $A^{II}\leq1{,}0$ bo‘lgan yoqilg‘i kam kulli yoqilg‘i (antratsitlar va toshko‘mirlarning asosiy qismi) hisoblanadi. qo‘ng‘ir ko‘mirlar uchun keltirilgan kullik A^{II}=1,9-2,4 ga teng bo‘lsa, yonuvchi slanetslar uchun esa bu ko‘rsatkich A^{II}=5-10 (%·kg)/MJ gateng bo‘ladi.

W^{II} va A^{II} qiymatlarining yuqori bo‘lishi, yoqilg‘i ballastida yonmaydigan tashkil etuvchilarning salmog‘i ko‘p ekanligini bildiradi va bu esa yoqilg‘i energetik ko‘rsatkichining past ekanligini anglatadi. Bunday yoqilg‘ilarni uzoq masofalarga transportirovka qilish iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq emas. Bu yoqilg‘ilar qazib olingan konlariga yoki chiqarib olinadigan joylariga yaqin sanoat korxonalarida ishlatilishi maqsadga muvofiq va shuning uchun ham bu yoqilg‘ilar ko‘pincha mahalliy yoqilg‘ilar deb ham ataladi.

Masalalar

66. Yoqilg'i xossalari jadvallarida quyidagi tarkib ko'rsatilgan bo'lsa, ish holatidagi yoqilg'ining tarkibini aniqlang: S_1^r=38,6%; N_1^r=2,6%; S_1^r=3,8%; N_1^r=0,8%; O_1^r=3,1%; W_1^r=11+№/2 %; A_1^r– qolganlari. Texnik tahlil shuni ko'rsatdiki, yoqilg'ining haqiqiy namligi W_2^r=16+№/2 %. Haqiqiy namlikdagi yoqilg'ining tarkibini va uning yonish issiqligini aniqlang.

67. Yoqilg'i tarkibi quyidagicha berilgan: S^s=50+№/2 %; N^s=№/5 %; S^s=1+№/20 %; N^s=1%; O^s=5+№/20 %; qolganlari - A^s; W^r=№ %. Ish sharoitida quyi yonish issiqligi qiymatini aniqlang.

68. Gazli yoqilg'ining tarkibi quyidagicha berilgan: SN_4=50-№ %; SO=10+№/2 %; N_2=10+№/2 %; qolganlari - N_2. Yonish issiqligini aniqlang.

69. Gaz holatidagi yoqilg‘ining tarkibi quyidagicha berilgan: SN_4=50+№ %; N_2=25-№ /2 %; SO=25-№/2 %. Yoqilg‘i sarfi V=3000+№·10 m^3/soat bo‘lsa, issiqlik quvvatini aniqlang.

Nazorat savollari

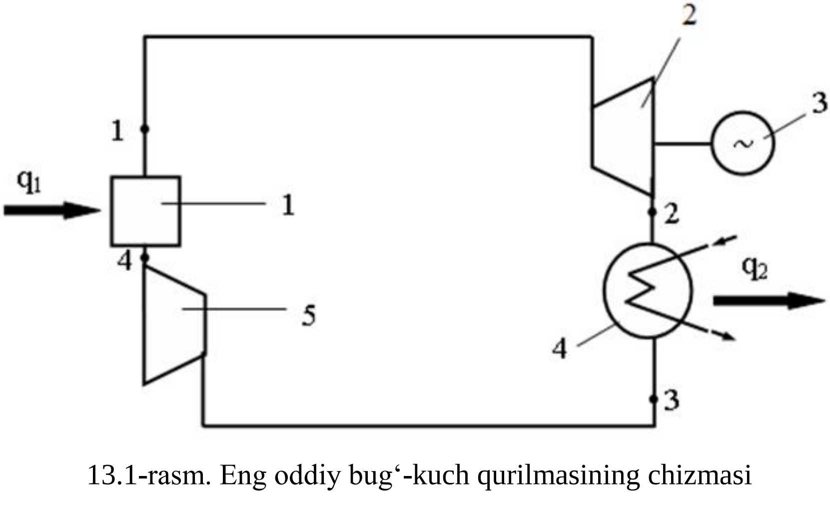
1. Yoqilg‘i deb nimaga aytiladi?
2. Yoqilg‘i ishchi massasining elementar tarkibi qanday yoziladi?
3. Yoqilg‘i analitik massasining elementar tarkibi qanday yoziladi?
4. Yoqilg‘i quruq massasining elementar tarkibi qanday yoziladi?
5. Yoqilg‘i yonuvchi massasining elementar tarkibi qanday yoziladi?
6. Yoqilg‘ining qanday xossalarini bilasiz?
7. Yoqilg‘ining kulligi va namligini tushuntirib bering.
8. Yoqilg‘i qanday yonishi issiqligiga ega?

12. Bug‘-kuch va sovutish qurilmalarining sikllari

12.1. Bug‘-kuch qurilmasi. Renkin sikli

Bug‘-kuch qurilmalarida ishchi jism sifatida turli suyuqliklarning (suv, simob va boshqalar) bug‘laridan foydalaniladi, biroq ko‘pincha suv bug‘idan foydalaniladi.

Bug‘-kuch qurilmasi (12.1-rasm) quyidagicha ishlaydi: 1 bug‘ qozonida o‘choqda yoqilg‘ini yoqish hisobiga olinadigan Q_1 issiqlikni olib kelish hisobiga p_1 o‘zgarmas bosimli bug‘ hosil bo‘ladi. 2 bug‘ni o‘ta qizdirgichda u qo‘shimcha ravishda qizdiriladi va o‘ta qizigan bug‘ holatiga o‘tadi. Bug‘ bug‘ni o‘ta qizdirgichdan 3 bug‘ dvigateliga (masalan, bug‘ turbinasiga) kirib keladi, bu yerda to‘liq yoki qisman p_1 bosimgacha kengayadi va L_1 foydali ish olinadi. Ishlab bo‘lgan bug‘ 4 sovutgich-kondensatorga yo‘naltiriladi, bu yerda u p_1 o‘zgarmas bosimda qisman yoki to‘liq kondensatsiyalanadi. Bug‘ning kondensatsiyalanishi ishlab bo‘lgan bug‘ bilan 4 sovutgich-kondensator orqali oqib o‘tadigan sovituvchi suyuqlik o‘rtasida issiqlik almashinishi natijasida sodir bo‘ladi.

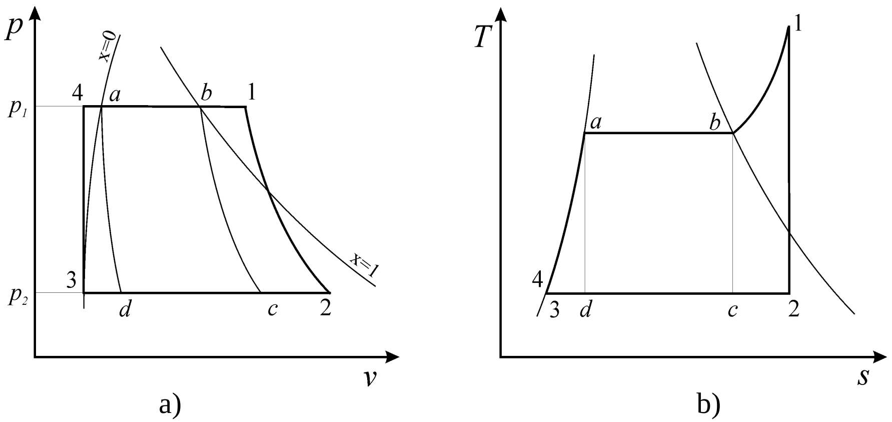


13.1-rasm. Eng oddiy bug‘-kuch qurilmasining chizmasi

Sovutgichdan keyin, kondensatsiyalangan bug‘ 5 nasosning kirishiga kirib keladi, bu yerda suyuqlikning bosimi p_2 kattalikdan p_1 boshlang‘ich qiymatgacha ortadi, shundan keyin suyuqlik 1 bug‘ qozoniga

kelib tushadi. Qurilmaning sikli yopiladi. Agar 4 sovutgichda ishlab bo‘lgan bug‘ning qisman kondensatsiyalanishi sodir bo‘lsa, u holda bug‘-kuch qurilmasida 5 nasosning o‘rniga kompressordan foydalaniladi, bu yerda bug‘-suv aralashmasining bosimi ham p_2 dan p_1 gacha oshiriladi. Biroq siqishga ketadigan ishni kamaytirish uchun bug‘ning kondensatorda to‘liq kondensatsiyalanishi va so‘ngra nasos-kompressorda bug‘-suv aralashmasini emas, kondensatordan chiqayotgan suvni siqish maqsadga muvofiq bo‘ladi. Bunday sikl Renkin sikli deb ataladi.

Renkin sikli (12.2-rasm) isitgichga issiqlik olib kelinadigan 4–1 izobara, bug‘ning bug‘ turbinasida 1–2 kengayish adibatasi, sovutgich-kondensatorda issiqlikni olib ketish 2–3 izobarasi va nasosda suvning bosimining 3–4 ortish izoxorasidan tashkil topadi. Izobarada 4–5 chiziq nasosdan keyin suyuqlikning harorati r_1 bosimda qaynash haroratigacha ortishi jarayoniga mos keladi. 5–1′ uchastka qaynayotgan suyuqlikning quruq to‘yingan bug‘ga aylanishiga, 1′–1 uchastka esa – quruq to‘yingan bug‘ni o‘ta qizigan bug‘ga aylantirish uchun bug‘ni o‘ta qizdirgichga issiqlikni olib kelish jarayoniga mos keladi.



12.2-rasm. *p-v* (a) va *T-s* (b) koordinatalarda Renkin sikli.

Turbinada bug‘ tomonidan amalga oshiriladigan ish bug‘ning turbinadan oldingi va keyingi entalpiyalarining farqiga teng

$$w_T = h_1 - h_2. \qquad (12.1)$$

Nasosda suvni siqishga sarflangan ish xuddi shunday – ishchi jismning 4 va 3 nuqtalardagi entalpiyalarining farqi sifatida aniqlanadi.

P–v koordinatalarda bu ish a34b maydon bilan aniqlanadi (13.2,a-rasmga qaralsin). Bu ish turbinaning ishiga qaraganda juda kichik.

Siklning foydali ishi turbinaning ishidan nasosni yuritishga sarflangan w_H ishni ayirishga teng

$$w = w_T - w_H \approx w_T = h_1 - h_2. \qquad (13.2)$$

$$w_H = h_4 - h_3. \qquad (12.3)$$

Qozonda va suvni o‘ta qizdirgichda olib kelingan q_1 solishtirma issiqlik miqdori termodinamikaning birinchi asosidan (bunda ish sodir bo‘lmaydi) issiqlikni olib kelish jarayonida ishchi jismning entalpiyalarining farqi sifatida aniqlanadi

$$q_1 = h_1 - h_4 = h_1 - h_K, \qquad (12.4)$$

bu yerda h_K – p_2 bosimda issiq suvning (kondensatning) entalpiyasi, amalda suvning 3 va 4 nuqtalardagi entalpiyalariga teng, ya’ni $h_4 = h_3 = h_2$.

Ushbu nisbatlarni taqqoslash bilan Renkin siklining termik FIK ni siklda olingan foydali ishning olib kelingan issiqlik miqdoriga nisbati sifatida aniqlash mumkin

$$\eta_t = \frac{w}{q_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_K}. \qquad (12.5)$$

Bug‘-kuch qurilmasining boshqa bir muhim tavsifi – *d solishtirma bug‘ sarfi* bo‘lib hisoblanadi, u 1 kVt·soat (3600 J) energiyani ishlab chiqarish uchun zarur bo‘ladigan bug‘ miqdorini tavsiflaydi.

Ideal Renkin siklida solishtirma bug‘ sarfi

$$d = \frac{3600}{w} = \frac{3600}{h_1 - h_2} \text{кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}). \qquad (12.6)$$

Solishtirma bug‘ sarfi agregatlarning o‘lchamini belgilaydi: u qanchalik katta bo‘lsa, xuddi o‘sha quvvatni olish uchun shunchalik ko‘p bug‘ ishlab chiqarishga to‘g‘ri keladi.

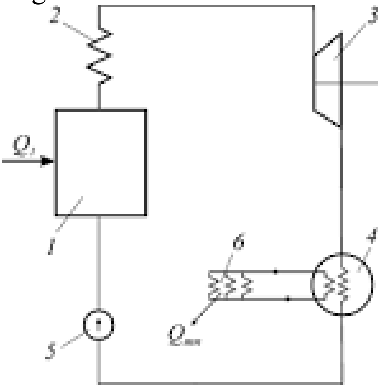
12.2. Bug‘-kuch qurilmalarining tejamkorligini oshirish yo‘llari

Renkin siklining FIK hatto yuqori parametrlarga ega bo‘lgan qurilmalarda ham 50% dan oshmaydi. Real qurilmalarda dvigatelda

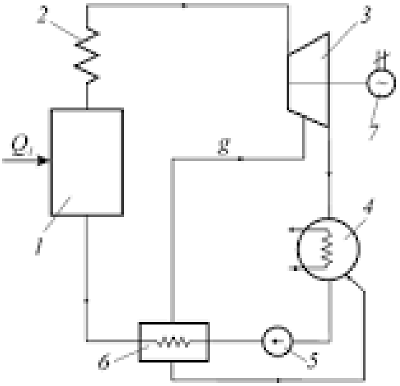
ichki yo‘qolishlarning borligi tufayli foydali ish koeffitsiyentining qiymati yanayam kichik bo‘ladi.

Bug‘-kuch qurilmalarining tejamkorligini oshirishning ikkita yo‘li: bug‘ning turbinaning oldidagi parametrlarini oshirish, ya’ni uning boshlang‘ich harorati va bosimini oshirish, va bug‘-kuch qurilmalarining chizmalarini murakkablashtirish mavjud.

Birinchi yo‘nalish turbina bo‘ylab kengayish jarayonida h_1-h_2 issiqlik tushishining ortishiga, va buning oqibati sifatida, siklning solishtirma ishi va foydali ish koeffitsiyentining ortishiga olib keladi. Bunda qurilmaning kondensatorida qarama-qarshi bosimni kamaytirish bilan, ya’ni p_2 bosimni kamaytirish bilan turbina bo‘ylab h_1-h_2 issiqlik tushishini qo‘shimcha ravishda oshirish mumkin. Bug‘-kuch qurilmalarining tejamkorligini bu yo‘l bilan oshirish bir qator qiyin texnik masalalarni hal qilish, xususan, turbinani tayyorlash uchun yuqori legirlangan, issiqlikka bardoshli materiallardan foydalanish bilan bog‘lanadi.



12.3-rasm. Mehanik energiya va issiqlikni birgalikda ishlab chiqariladugan qurilmaning sxemasi: 1-bug‘ generatori; 2-bug‘ni ortiqcha qizdirgich; 3,5 – bug‘g turbinasi; 4-kondensator; 6-issiqlikni iste’mol qiluvchi

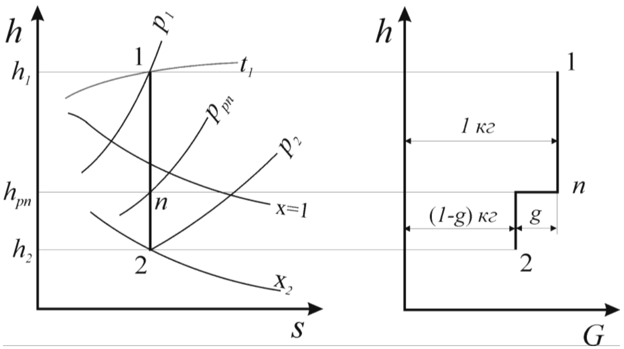


12.4-rasm. Oziqlantiruvchi suvni regenerativ tarzda isitadigan bug‘-kuch qurilmasining sxemasi

Bug‘-kuch qurilmasidan foydalanishning samaradorligini ishlab bo‘lgan bug‘ning issiqligidan keyinchalik isitish, issiq suv ta’minoti, materiallarni quritish va hokazolarda foydalanish hisobiga anchagina oshirish mumkin. Ushbu maqsad uchun 4 kondensatorda qizigan sovutuvchi suv havzaga tashlab yuborilmaydi (12.3-rasm), aksincha, bu suv 6 issiqlikni iste’mol qiluvchining isitish qurilmalari orqali haydaladi. Stansiya bunday qurilmalarda 3 mashinaning valida L_1 foydali ish ko‘rinishida mexanik energiya va isitish uchun $Q_{isitish}$ issiqlik ishlab chiqaradi. Bunday stansiyalar issiqlik-elektr markazlari (IEM) deb ataladi. Issiqlik energiyasi va elektr energiyasini kombinat-siyalangan ishlab chiqarish – issiqlik qurilmalarining samaradorligini oshirishning asosiy uslublaridan biri bo‘lib hisoblanadi. Issiqlik energiyasi ishlab chiqarish ko‘lamlari bo‘yicha Rossiya dunyoda etakchi o‘rinlardan birida turadi.

Bug‘-kuch qurilmasining foydali ish koeffitsiyentini Renkin sikliga qaraganda oshirish regenerativ sikl deb ataluvchi siklni qo‘llash hisobiga mumkin bo‘ladi (12.4-rasm). Bu chizmada 1 qozonga kirib keladigan oziqlantiruvchi suv kengayish paytida 3 turbinadan qisman olinadigan bug‘ bilan isitiladi. Bu chizma bo‘yicha, 1 qozonda olingan va 2 bug‘ni o‘ta qizdirgichda o‘ta qizdirilgan bug‘ 3 turbinaga yo‘nalti-riladi, bu yerda uning 4 kondensatordagi bosimgacha kengayishi sodir bo‘ladi. Biroq hamma bug‘ ham kondensatorga etib bormaydi, uning qandaydir bir g miqdori u qisman ish bajargandan keyin turbinadan chiqarib olinadi va 6 regenerativ isitgichga yo‘naltiriladi, (12.4-rasmga qaralsin), bu yerda u kondensatsiyalanish natijasida oziqlantiruvchi suvni isitadi, bu suv 5 nasos bilan 1 qozonga haydaladi.

Kondensatning o‘zi regenerativ isitgichdan keyin 5 nasosning kirishiga yoki 4 kondensatorga kirib keladi, bu yerda u turbina orqali o‘tgan bug‘ning kondensati bilan aralashadi. SHunday qilib, qozonga undan bug‘ ko‘rinishida chiqib ketgan miqdordagi oziqlantiruvchi suv kirib keladi. 12.5-rasmdagi diagrammadan ko‘rinib turibdiki, turbinaga kiradigan har bir kilogramm bug‘ $l_1=h_1-h_2$ ish bajarish bilan p_1 bosimdan p_2 bosimgacha kengayadi. Kilogrammning ($1 - g$) ulushi miqdoridagi bug‘ $l_2=h_2-h_3$ ish bajarish bilan p_3 oxirgi bosimgacha kengayadi. Regenerativ siklda 1 kg bug‘ning yig‘indi ishi quyidagiga teng bo‘ladi:



a) b)

12.5-rasm. Bug‘ni oraliq chiqarib olish (a) va bug‘ miqdorini o‘zgartirishga (b) ega bo‘lgan turbinada bug‘ning adiabatik kengayish grafigi.

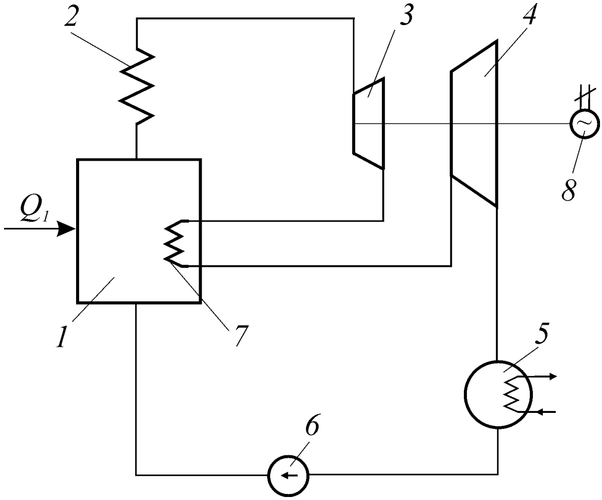
$$l = l_1 + l_2 = h_1 - h_2 = (h_2 - h_3)(1-g) = h_1 - h_3 - (h_2 - h_3)g. \qquad (12.7)$$

Tenglama shuni ko‘rsatadiki, regenerativ issiqlikdan foydalanish bug‘ning xuddi o‘sha parametrlariga ega bo‘lgan Renkin sikliga qaraganda solishtirma kengayish ishining kamayishiga olib keladi. Biroq hisoblashlar shuni ko‘rsatadiki, regenerativ siklda ish regeneratsiyalash bo‘lganda bug‘ni olishga ketadigan issiqlik sarfiga qaraganda sekinroq kamayadi. SHu sababli regenerativ isitishga ega bo‘lgan bug‘-kuch qurilmasining foydali ish koeffitsiyenti yakunda odatdagi siklning foydali ish koeffitsiyentiga qaraganda yuqori bo‘ladi.

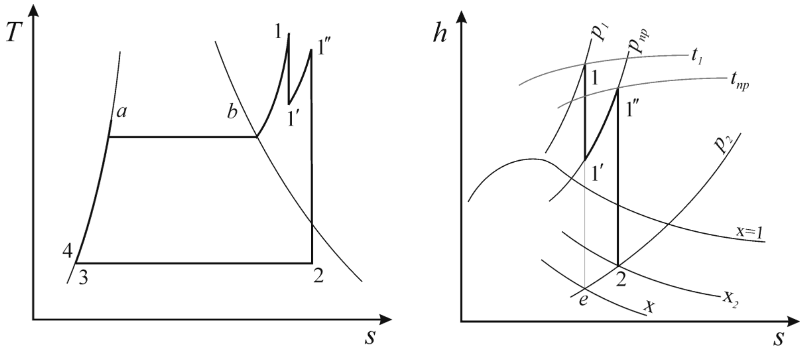
Qurilmalarning foydali ish koeffitsiyentini oshirish maqsadida yuqori va o‘ta yuqori bosimli bug‘ni qo‘llash jiddiy qiyinchiliklarga to‘qnash keladi: turbinaning oxirgi bosqichlarida uning namligi shunchalik yuqori bo‘ladiki, bu turbinaning foydali ish koeffitsiyentini anchagina pasaytiradi, kuraklarning eroziyalanishini chaqiradi, ishdan chiqishga sabab bo‘lishi mumkin. SHu sababli bug‘ning yuqori parametrlariga ega bo‘lgan qurilmalarda bug‘ni oraliq qizdirishni qo‘llashga to‘g‘ri keladi, bu ham qurilmaning foydali ish koeffitsiyentining ortishiga olib keladi. Qurilmaning tejamkorligini oshirishning bu usulining mohayati quyidagidan iborat (12.6-rasm).

3 yuqori bosimli turbinada kengaygandan keyin bug‘ 7 maxsus bug‘ni o‘ta qizdirgichga olib ketiladi, bu yerda u r_2 bosimda 4 haroratgacha ikkinchi marta qizdiriladi, bu harorat odatda t_1 haroratga

qaraganda biroz pastroq bo‘ladi. O‘ta qizigan bug‘ 4 past bosimli turbinaga kirib keladi, unda r_3 oxirgi bosimgacha kengayadi va 5 kondensatorga ketadi. 13.6-rasmdan ko‘rinib turibdiki, bug‘ni o‘ta qizdirish bo‘lganda bug‘ning turbinadan keyingi namligi o‘ta qizdirish bo‘lmagandagiga qaraganda anchagina kichik ($x_1>x_2$). Real sharoitlarda oraliq qizdirishni qo‘llash foydali ish koeffitsiyentini 4% atrofida oshiradi. Bu yutuq faqatgina past bosimli turbinaning nisbiy foydali ish koeffitsiyentining ortishi hisobiga emas, balki past va yuqori bosimli turbina bo‘ylab bug‘ning kengayishining yig‘indi ishining ortishi hisobiga ham olinadi. Gap shundaki, mos ravishda yuqori va past bosimli turbinalarning ishini tasiflaydigan *a –e* va *s – d* kesmalarning yig‘indisi *a – b* kesmadan katta bo‘ladi (13.6-rasmga qaralsin), chunki *s* – d kesma *e – b* kesmadan katta, shu sababli h – s koordinatalarda izobaralar chapdan o‘ngga qarab biroz siljiydi.



12.6-rasm. Bug‘ni oraliq qizdirishga ega bo‘lgan bug‘-kuch qurilmasining chizmasi:
1-bug‘ generatori; 2-bug‘ni o‘ta qizdirgich; 3-yuqori bosimli turbina (YUBT); 4-past bosimli turbina (PBT); 5-kondensator; 6-oziqlantiruvchi nasos; 7-oraliq bug‘ni o‘ta qizdirgich.

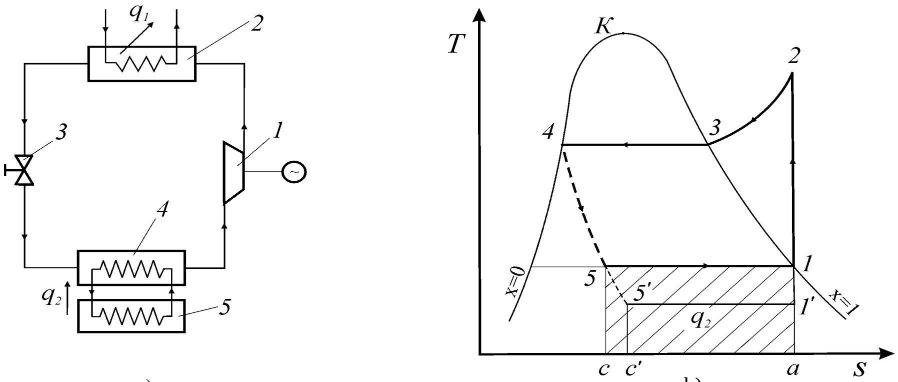


a) b)

12.7-rasm. Oraliq o‘ta qizdirgichga ega bo‘lgan qurilmada bug‘ning kengayish jarayonining T-s (a) va h-s (b) diagrammalarda ko‘rinishi

12.3. Sovutish qurilmasining sikllari

Sovutish qurilmasida jismlar atrof muhitning haroratidan past haroratgacha sovutiladi. Buni amalga oshirish uchun jismdan issiqlikni olish va tashqaridan olib kelinadigan ish hisobiga uni atrof muhitga uzatish zarur bo‘ladi.



a) b)

12.8-rasm. Bug‘li kompression sovutish qurilmasining chizmasi (a) *T-s* koordinatalarda sovutish qurilmasining sikli (b)

Sovutish qurilmalari sanoat, maishiy turmushda keng tarqalgan, ulardan erosti inshootlarini qurishda gruntni muzlatish va hokazolarda

keng foydalaniladi. Nazariy jihatdan sovutish qurilmasining ko‘proq foydali sikli – qaytar Karno sikli bo‘lib hisoblanadi. Biroq konstruktiv qiyinchiliklar tufayli sovutish qurilmalarida Karno siklidan foydala-nilmaydi, bu qiyinchiliklar mazkur siklni amalga oshirishda vujudga keladi, bundan tashqari, ishqalanish tufayli yo‘qolishlarning ta’siri shunchalik katta bo‘ladiki, bu Karno siklining afzalliklarini yo‘qqa chiqaradi.

12.4. Bug‘li kompression sovutish qurilmasi

Unchalik chuqur bo‘lmagan sovuqlikni olish uchun bug‘li kompression qurilmalar eng keng tarqalishga ega bo‘lgan (12.8a-rasm). Bunday qurilmalarda ishchi jism sifatida past haroratda qaynaydigan suyuqliklardan (ammiak, freon va boshqalar) foydalaniladi. Sovutish qurilmasi 5 sovutish kamerasi – bu yerda harorat Atrof muhitning haroratidan past bo‘lishi lozim – 1 kompressor, 4 bug‘latgich, 2 kondensator va 3 rostlovchi (drossellaydigan) ventildan tashkil topadi. Qurilma quyidagicha ishlaydi. 1 kompressor 4 bug‘latgichdan $p_1=const$ o‘zgarmas bosimda nam yoki quruq bug‘ ko‘rinishidagi atmosfera bosimidan yuqori bosimli va manfiy haroratli sovuqlik tashuvchi agentni so‘rib oladi (1 nuqta) va uni 1-2 adiabata bo‘yicha r_2 yuqoriroq bosimgacha siqadi. Bunda agentning harorati diagrammadagi 2 nuqtada musbat bo‘lib qoladi va sovutuvchi suvning haroratidan yuqori bo‘ladi, bu suv berilgan qurilmada Atrof muhit rolini o‘ynaydi. Ana shu parametrlarda kompressor odatda o‘ta qizigan bug‘ni 2 kondensatorga siqib chiqaradi, bu yerda sovutuvchi suv undan o‘ta qizish va bug‘ hosil bo‘lish issiqligini oladi (13.8,b rasmda 2–3–4 jarayon). Buning oqibatida bug‘ $p_2=const$ bosimda to‘liq kondensatsiyalanadi (4 nuqta). Kondensat ventil orqali o‘tadi (12.8,a rasmga qaralsin), bu yerda u p_1 bosimgacha drossellanadi ($h=const$ da 4-5 chiziq) va 4 bug‘latgichga kirib keladi, bu yerda sovutiladigan jismlardan issiqlikni olish bilan bug‘lanadi (diagrammada 5–1 jarayon) va yana 1 kompressor bilan so‘rib olinadi. Sikl takrorlanadi. Katta quvvatli qurilmalarda 5 sovutish kamerasi bilan 4 bug‘latgich o‘rtasida eritma sirkulyasiyalanadi, u 5 kamerada sovutiladigan jismlardan q_2 issiqlikni oladi. Bu issiqlikdan 4 bug‘latgichda sovuqlik tashuvchi agentni bug‘latish uchun foydalaniladi. Kichik quvvatli sovutgichlarda, masalan, maishiy uy sovutgichlarida bug‘latgich sovutish kamerasining

o‘zida joylashadi va eritmaga ehtiyoj bo‘lmaydi. *T–s* diagrammada sovutish kamerasida jismlardan olinadigan q_2 issiqlikka s51a maydon, kompressorda bug‘ni siqishda sarflanadigan 1_s ishga 12345 maydon mos keladi. $q_1 = q_2 + l_s$ issiqlik, unga sa12345s maydon mos keladi, sovutuvchi suvga, yoki, masalan, maishiy uy sovutgichlaridagi kabi havoga beriladi.

Sovutish qurilmalarining termodinamik samaradorligi issiqlik-kuch qurilmalaridagi kabi termik foydali ish koeffitsiyenti bilan emas, balki *χ sovutish koeffitsiyenti* bilan baholanadi. Sovutish koeffitsiyenti deganda q_2 olingan issiqlik miqdorining l_s siklda sarflangan ishga nisbati tushuniladi:

$$\chi = q_2 / l_ц \,. \qquad (12.8)$$

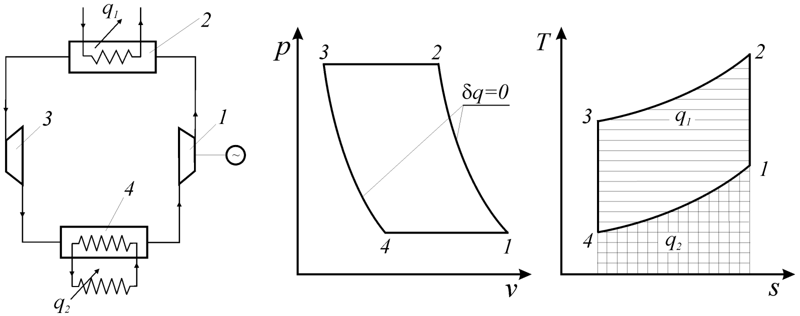
Sovutish qurilmasining sovutish kamerasidagi harorat 3 rostlovchi ventilning holatiga bog‘liq bo‘ladi. Masalan, bu haroratni kamaytirish zarur bo‘lganda ventil qo‘shimcha ravishda yopiladi, buning natijasida chuqurroq drossellanish sodir bo‘ladi (12.8,b-rasmga qaralsin, 4–5’ chiziq).

Bunda issiqlikni olish jarayoni endilikda 5'–1' chiziq bo‘yicha boradi. χ qurilmaning tejamkorligi q_2 kattalikning kamayishi va kompressorni yuritishga sarflanadigan ishning ortishi tufayli kamayadi.

12.5. Havo bilan sovutish qurilmasi

Ko‘proq chuqur sovuqlikni olish uchun havo bilan sovutish qurilmasidan foydalaniladi (12.9-rasm).

Havo bilan sovutish qurilmasining harakat tamoyili oldindan siqilgan va sovutilgan havoning kengayishiga asoslanadi. Havo 4 sovuqlik kamerasidan p_1 bosim ostida 1 kompressorga kirib keladi, bu yerda ish sarflash bilan p_2 bosim va T_2 haroratgacha siqiladi (1-2 adiabata). Siqilgan havo 2 issiqlik almashinish qurilmasiga beriladi, bu yerda oqar suv bilan T_3 haroratgacha sovutiladi (2–3 jarayon) va 3 dvigatelga beriladi, bu yerda T_4 harorat va p_1 bosimgacha adiabatik tarzda kengayadi (3-4 jarayon). Sovutilgan havo sovuqlik kamerasiga kelib tushadi va bu yerda T_1 haroratgacha isiydi (4–-1 jarayon).



a) b) d)

12.9-rasm. Havo bilan sovutish qurilmasining chizmasi (a) va qurilmaning *p-v* (b) va *T-s* (d) diagrammalarda ko‘rinishi

Sovutuvchi suvga berilgan solishtirma issiqlik miqdori $q_1 = c_p(T_2 - T_3)$, sovuqlik kamerasida havoga olib kelingan solishtirma issiqlik miqdori esa $q_2 = c_p(T_1 - T_4)$ bo‘ladi. Doimiy issiqlik sig‘imida siklning solishtirma ishi

$$l_ц = l_{1,2} - l_{3,4} = q_1 - q_2 = c_p(T_2 - T_3 - T_1 + T_4), \qquad (12.9)$$

yoki 1–2 va 3–4 adiabatik jarayonlar uchun quyidagi haroratlar nisbati adolatli bo‘ladi:

$$T_1/T_2 = T_4/T_3\,;\, T_1/T_4 = T_2/T_3\,, \qquad (12.10)$$

$$l_ц = c_p(T_2 - T_1)(1 - T_3/T_2). \qquad (12.11)$$

Havo bilan sovutish qurilmasining sovutish koeffitsiyenti

$$\chi = q_2/l_ц . = (T_1 - T_4)/(T_2 - T_1)\left(1 - {}^{T_3}\!/_{T_2}\right) = T_1/(T_2 - T_1) \qquad (12.12)$$

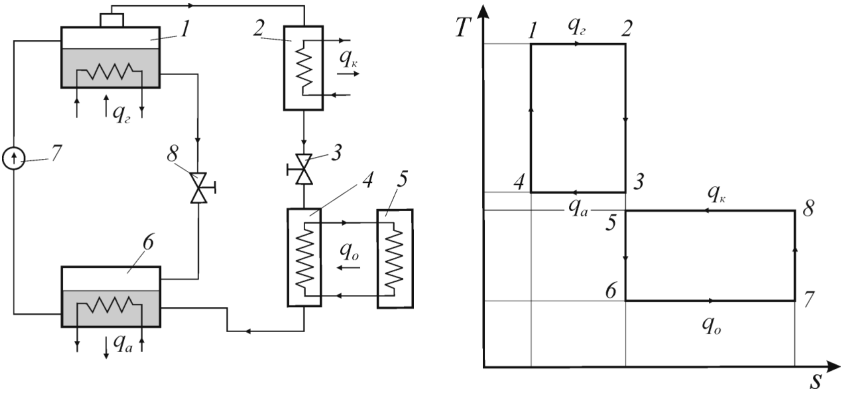
Havoning issiqlik sig‘imining qiymati kichik bo‘lishi oqibatida havo bilan sovutish qurilmalarining solishtirma sovuqlik ishlab chiqarish unumdorligi past bo‘ladi.

12.6. Absorbsion sovutish qurilmasi

Ba’zan sovutish siklini amalga oshirish uchun oldingi holatlardagi kabi mexanik energiyani emas, balki ishlab bo‘lgan ishchi jismdan (masalan, bug‘ yoki gaz-turbinali qurilmaning ishchi jismidan) olina-

digan issiqlikni sarflash ko‘proq maqsadga muvofiq bo‘ladi. Absorbsion sovutish qurilmasi ana shu tamoyil bo‘yicha ishlaydi.

Absorbsion sovutish qurilmasi ishchi jism sifatida absorberdagi sovuqlik tashuvchi agentdan (xuddi o‘sha bitta bosimda turlicha qaynash haroratlariga ega bo‘lgan moddalar) foydalanadi. Absorberdagi sovuqlik tashuvchi agent sifatida ammiakdan, absorber sifatida esa – suvdan foydalanish mumkin.



a) b)

12.10-rasm. Absorbsion sovutish qurilmasining chizmasi (a) va qurilmaning T-s diagrammada ko‘rinishi

Ideal absorbsion qurilmaning chizmasi 12.10-rasmda ko‘rsatilgan. 1 generatorning zmeevigi orqali qurilmaning boshqa elementlaridagiga qaraganda yuqoriroq haroratli va yuqoriroq bosimli issiq bug‘ o‘tadi. Eritma tomonidan bug‘dan qabul qilib olinadigan q_1 solishtirma issiqlik bug‘lanishga sarflanadi. Hosil bo‘lgan bug‘ kichik konsentratsiyali eritmaning qaynashi oqibatida sovuqlik tashuvchi agentning yuqoriroq konsentratsiyasiga ega bo‘ladi. Bug‘ 1 generatordan 2 kondensatorga kirib keladi, q_k solishtirma issiqlik miqdorini T_5 haroratda zmeevik orqali o‘tadigan suvga berish bilan yuzalarga kondensatsiyalanadi.

Kondensat drossellaydigan ventil orqali o‘tadi, undan chiqishda p_2 bosimga va sovuqlik kamerasidagi haroratga qaraganda past bo‘lgan T_6 haroratga ega bo‘ladi. 4 bug‘latgichda eritma sovutiladigan hajmdan q_x issiqlikni olib kelish hisobiga bug‘lanadi. Bug‘ 4 bug‘latgichdan 6

absorberga kelib tushadi, bu yerda 8 ventil orqali 1 generatordan kirib keladigan absorber bilan T_0 haroratda absorbsiyalanadi, q_a absorbsiya issiqligini T_4 haroratda zmeevik orqali o‘tadigan sovutuvchi suvga beradi. Konsentratsiyalangan bug‘ni yutish oqibatida absorberda joylashgan eritmada sovuqlik tashuvchi agentning konsentratsiyasi ortadi. Eritma 7 nasos bilan 6 absorberdan 1 generatorga uzatiladi.

Ko‘rib chiqilayotgan qurilmaning ishi ideallashtirilsa (jarayonlarning to‘liq qaytarligi, sovuqlik tashuvchi agentning absorberdan to‘liq bug‘lanishi), uni to‘g‘ri (1234) va teskari (5678) Karno sikllari jamlanmasi ko‘rinishida taqdim qilish mumkin. Absorbsion mashinaning issiqlik tejamkorligini issiqlik koeffitsiyenti bilan baholash mumkin.

$$\xi_T = |q_x| - |q_1| \qquad (12.13)$$

Shundan kelib chiqqan holda berilgan issiqlik sarfida sovutiladigan hajmdan qanchalik ko‘p solishtirma issiqlik olinsa, sovutish qurilmasining tejamkorligi shunchalik yuqori bo‘ladi. Absorbsion sovutish qurilmasining haqiqiy sikli jarayonlarning qaytmasligi bilan tavsiflanadi. Bularning barchasi ξ_T ning qiymatining bir qadar kamayishiga olib keladi.

Masalalar

70. Turbinadan avvalgi parametrlari P_1=90 at, kondensatordagi bosim P_2=0,04 at. Agar nisbiy ichki FIK. η_{oi}=0,84 bo‘lsa, turbinada kengaygandan keyingi bug‘ning holatini aniqlang.

Yechish:

Mumkin bo‘lgan issiqlik tushishini aniqlaymiz.

$H_0=h_1-h_2$=329,7 kkal/kg.

Haqiqiy issiqlik tushishi:

$H_i=h_0\ \eta_{oi}$=329,7·0,84=276,9 kkal/kg=1160,2 kJ/kg.

Turbinadan avvalgi entalpiya:

$H_{2x}=h_1-H_i$=808,2 – 276,9=531,3 kkal/kg=1426 kJ/kg.

71. Regeneratsiyasiz ishlaydigan quvvati N_0=250 mVt, bosimi P_1=235 ata, t=556^{0}C, P_2 =0,35 ata bo‘lgan o‘ta qizigan bug‘ning kondensatsion turbinadagi soatlik sarfi va solishtirma sarfini aniqlang. Turbinaning FIK n_{oi}=0,85, mexanik FIK n_m =0,98, elektr generatorning FIK n_1=0,37.

Javob: D=17,2 kg/soat; d=1,3 kg/kVt·soat.

72. Boshlang‘ich parametrlari P_1=90, t=480^{0}C va oxirgi bosimi P_2=0,04 at bo‘yicha ishlaydigan bug‘ turbinasining mutlaq ichki FIK ni aniqlang, agar nisbiy ichki FIK η_{oi}=0,82 bo‘lsa.

Javob: n_o=0,344.

73. Bug‘ urbine qurilmasi Renkin sikli bo‘yicha quyidagi parametrlar bilan ishlaydi: P_1= 9 Mpa, t_1 =535^{0}C, kondensator-dagi bosim P_2= 40 kPa. Turbina va ta’minlovchi nasosning ishini, ta’minlovchi nasos ishlaganda va ishlamagandagi termik FIKlarini hamda ularning farqlarini aniqlang.

Javob: l_t=1435 kJ/kg, l_{nas}=9,2 kJ/kg, η_t =0,426,
nasossiz ishlaganda η_t =0,428, $\Delta\eta_t$ /η_t =0,4 %.

74. Boshlang‘ich parametrlari P_1= 20 bar, t_1 =400^{0}C, kondensator-dagi bosim P_2= 0,04 bar bo‘lgan suv bug‘I Renkin sikli bo‘yicha ishlaydi. Shu siklning bajargan ishini toping.

Javob: l_0=1161 kJ/kg.

Nazorat savollari

1. Bug‘-kuch qurilmalarida ishchi jism sifatida nimalardan foydalaniladi?
2. Renkin siklini tushuntirib bering.
3. Bug‘-kuch qurilmalarining tejamkorligini oshirish yo‘llari nimadan iborat?
4. Sovutish qurilmalari kanday siklda ishlydi va ular kaerlarda ishlatiladi?
5. Bug‘li kompression sovutish qurilmasining vazifasiga nimalar kiradi?
6. Havo bilan sovutish qurilmasi kanday ishlaydi?
7. Aborbsion sovutish qurilmasini ishlash uslubi nimadan iborat?

13. Ichki yonuv dvigatellarining sikllari

Issiqlik mashinalarining termodinamik sikllari quyidagicha ideallashtiriladi:

- barcha jarayonlar qaytar bo‘lib hisoblanadi va ishchi jismning xuddi ishga bitta miqdori bilan kechadi;
- ishchi jismning kimyoviy tarkibi o‘zgarmaydi;
- ishchi jismning siqilish va kengayish jarayonlari adiabatik jarayonlar bo‘lib hisoblanadi;
- ishchi jismga issiqlikni olib kelish issiq manbadan amalga oshiriladi;
- issiqlik ishchi jismdan sovuq manbaga uzatiladi;
- ishchi jismning issiqlik sig‘imi haroratga bog‘liq bo‘lmaydi;
- ishchi jism – ideal gaz bo‘lib hisoblanadi.

Issiqlik dvigatellarining termodinamik sikllarini tavsiflaydigan parametrlar quyidagilar bo‘lib hisoblanadi:

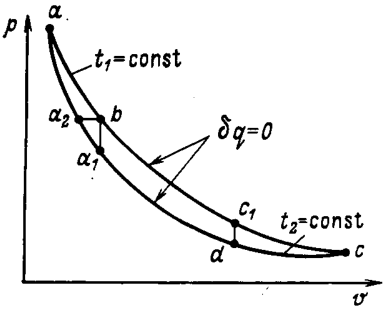
- siqish darajasi
- bosimni oshirish darajasi
- dastlabki kengayish darajasi
- siqish bosimlarining nisbati
- siklning chegara haroratlarining nisbati

13.1. Porshenli ichki yonuv dvigatellarining sikllari

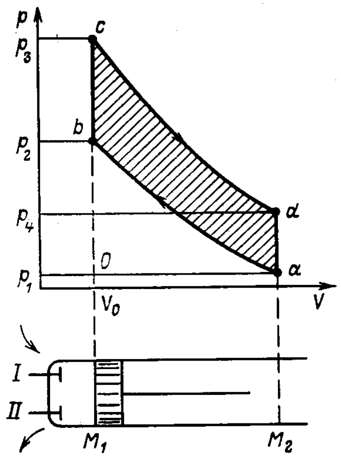
Aylanma jarayonlarni tahlil qilish shuni ko‘rsatadiki, siklda ishchi jismning harorati qanchalik yuqori bo‘lsa, siklning termik foydali ish koeffitsiyenti – dvigatelning tejamkorligining asosiy tavsifi – shunchalik yuqori bo‘ladi. SHu sababli dvigatelda ishchi jism sifatida suyuq yoki gazsimon yoqilg‘ini yoqishda olinadigan yonish mahsulotlaridan foydalaniladi, chunki suyuq yoki gazsimon yoqilg‘ilar dvigatelning siklida o‘ta yuqori haroratlarni olish imkonini beradi. YOqilg‘i odatda dvigatelning silindrlarida yoqiladi, bu yerda porshen ilgarilanma-qaytar harakat qiladi. Bunday dvigatellar porshenli ichki yonuv dvigatellari deb ataladi, yoki ularni IYOD deb atash qabul qilingan. Karno sikli eng yuqori foydali ish koeffitsiyentiga ega ekanligiga qaramasdan, real mashinalarda u amalga oshirilmaydi. Gap

shundaki, Karno sikli *r–υ* koordinatalarda kuchli cho‘zilgan bo‘lgani holda o‘ta katta hajmlar va o‘ta katta bosimlar bilan bog‘lanadi (14.1-rasm). Siklning υ_c/υ_a chekka hajmlarining nisbati (bu kattalik porshenli ichki yonuvdvigatellarida siqish darajasi deb ataladi) bu yerda 400 ga, a nuqtada bosim esa 280 – 300 MPa ga etadi. Bunday parametrlarga ega bo‘lgan dvigatel real bo‘lmaydi, chunki zamonaviy ichki yonuvdvigatellarining silindrlaridagi bosim kamdan-kam hollarda 10 MPa dan, siqish darajasi esa 16 – 18 dan oshadi. Bundan tashqari, Karno siklida bajariladigan ish juda kichik va dvigatel amalda faqatgina o‘z-o‘ziga xizmat ko‘rsatishga (o‘ziga) ishlaydi. A nuqtada bosimni va siqish darajasini pasaytirish uchun Karno sikli o‘zgartiriladi. Masalan, issiqlikni olib ketish *s–d* izoterma bo‘yicha emas, balki c_1*–d* izoxora bo‘yicha amalga oshiriladi; issiqlikni olib kelish *a–b* izoterma bo‘yicha emas, balki a_1*–b* izoxora bo‘yicha yoki a_2*–b* izobara bo‘yicha amalga oshiriladi. SHunga muvofiq, etalon sikl sifatidagi Karno siklidan bu yerda ikkita sikl olinadi: O‘zgarmas hajmda issiqlik olib kelinadigan sikl (ε –V Otto sikli) - ikkita izoxora va ikkita adibatadan tashkil topadigan a_1bc_1d sikl va o‘zgarmas bosimda issiqlik olib kelinadigan sikl (ε - r Dizel sikli) - a_2*–b* izobara, s_1*–d* izoxora va ikkita *b–*c_1 va *d–*a_2 adiabatalardan tashkil topadigan a_2bc_1d sikl. Olingan sikllar garchi Karno siklining foydali ish koeffitsiyentiga qaraganda kichikroq foydali ish koeffitsiyentiga ega bo‘lsada, ko‘proq kalta silindrda kamroq ishqalanish yo‘qolishlari bilan tavsiflanadi.

Porshenli ichki yonuv dvigatellarining ishi odatda indikator diagrammasi yordamida baholanadi, u porshen harakatlanganda silindrda bosim va hajm o‘zgarishining o‘zaro bog‘lanishini ko‘rsatadi.

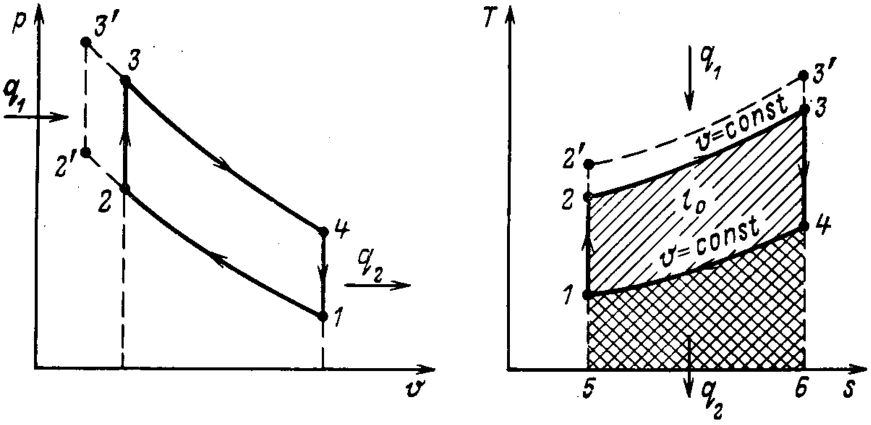


13.1 rasm. *p-v* koordinatalarda Karno sikli



13.2- rasm. Otto siklining nazariy diagrammasi

Porshen M_1 ichki nuqtadan M_2 tashqi nuqtaga qarab harakatlanganda (13.1-rasm) I klapan ochiladi va dvigatelning silindriga dvigatelning qurilmalarida oldindan tayyorlangan havo va yoqilg‘i aralashmasi r_1 bosimda so‘riladi (*oa* chiziq). Porshen orqaga qarab harakatlanganda I va II klapanlar yopiq bo‘ladi va aralashma *a* — *b* adiabata bo‘yicha p_2 bosimgacha siqiladi. Hajm silindrning yonish kamerasining hajmiga teng bo‘lgan V_0 gacha kamayadi. M_1 nuqtada aralashmaning elektr zaryadidan alangalanishi sodir bo‘ladi, va ishchi aralashma oldindan tayyorlangan va yaxshilab aralashtirilgan bo‘lganligi sababli u etarlicha tez va nazariy jihatdan o‘zgarmas hajmda yonadi. Sikl ba’zan tezkor yonish sikli deb ataladi.



a) b)

13.3-rasm. Otto siklining *p-v* (a) va *T-s* (b) diagrammalarda ko‘rinishi

Yonish mahsulotlaridan ajralib chiqqan issiqlik *v=const* sharoitlarda silindrda bosim va haroratning keskin ortishini chaqiradi *(b–s* – yoqilg‘ining issiqligini olib kelish chizig‘i). Hosil bo‘lgan yonish mahsulotlari foydali ish bajarish bilan *s–d* chiziq bo‘yicha adiabatik tarzda kengayadi. M_2 nuqtada II chiqaruvchi klapan ochiladi va yonish mahsulotlari atmosferaga chiqarib yuboriladi. Nazariy jihaptdan chiqarib yuborish *d–a* chiziq bo‘yicha amalga oshiriladi deb hisoblanadi. Dvigatelning silindrida qolgan gazlar porshen bilan r_1 atmosfera bosimida, porshen M_2 nuqtadan M_1 nuqtaga qarab borganda atmosferaga chiqarib yuboriladi. (*a–o* chiziq). So‘ngra sikl takrorlanadi. *absd* yopiq kontur nazariy jihatdan bir porsiya yoqilg‘i yonganda dvigatelning bitta siklidagi ishni tavsiflaydi. Ichki yonuv dvigatellarining sikllarining samaradorligini va dvigatellarning ishlashiga ta’sir ko‘rsatuvchi omillarni, garchi real dvigatellar bunday sikllar bo‘yicha ishlamasada, dvigatellarning ideal sikllarining ishini tahlil qilish asosida *p-v, T–S* koordinatalarda baholash qulay va ko‘rgazmali bo‘ladi (14.3,a-rasm). 1–2 chiziq ishchi jismning adiabatik siqilishini, 2–3 chiziq - q_1 miqdordagi issiqlikni 1 kg ishchi jismga olib kelishni, 3–4 chiziq – adiabatik kengayishni va 4–1 chiziq – q_2 miqdordagi issiqlikni izoxorik olib ketishni tavsiflaydi. Siklda foydali ish olib kelingan va olib ketilgan issiqliklar farqiga teng $l_0=q_1- q_2$ va

son jihatidan 1234 maydonga teng. Siklning muhim tavsifi – siqish darajasi bo‘lib, V_1 silindrning to‘liq hajmining V_2 silindrning yonish kamerasining hajmiga nisbati sifatida aniqlanadi.

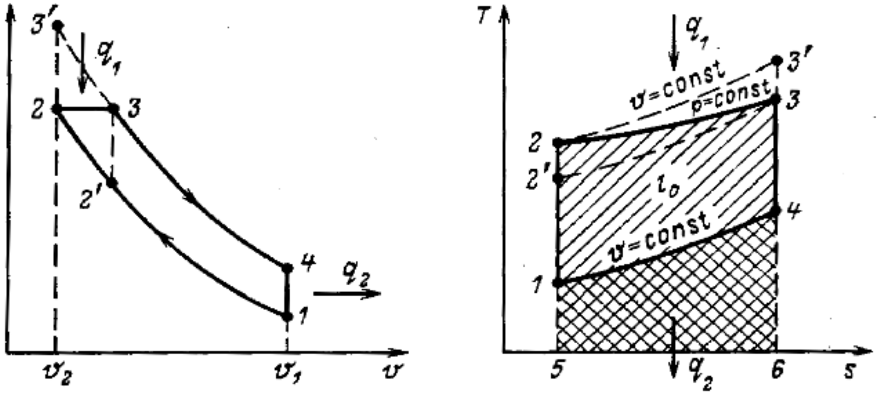
$$\varepsilon = V_1/V_2 = \upsilon_1/\upsilon_2. \qquad (13.1)$$

Siklning siqish darajasi siklning foydali ish koeffitsiyentiga juda kuchli ta’sir ko‘rsatadi. Siqish darajasi qanchalik yuqori bo‘lsa, siklning foydali ish koeffitsiyenti shunchalik yuqori bo‘ladi. Haqiqatan ham, agar Otto siklida (13.3,a-rasmga qaralsin) siqish 2' nuqtagacha olib borilsa, issiqlik esa *2'–3'* izoxora bo‘yicha olib kelinsa, u holda 12'3'4 sikl 1234 siklga qaraganda katta siqish darajasiga ega bo‘ladi. SHunga mos ravishda siqishning oxirgi harorati 2' nuqtada 2 nuqtadagiga qaraganda yuqori bo‘ladi va shundan kelib chiqqan holda, *2'–3'* izoxora *T - s* koordinatalarda *2–3* izoxoraga qaraganda yuqoridan o‘tadi. Bu - 12'3'4 siklda olib kelinadigan issiqlik miqdori (2'3'65 maydon) 1234 sikldagiga qaraganda (14.3,b-rasmdagi *2365* maydon) katta bo‘lishini, sikllarda 1465 maydon bilan aniqlanadigan va taqqoslanadigan olib ketilgan issiqlik miqdori esa bir xil bo‘lishini anglatadi. SHundan kelib chiqqan holda, $\eta_t=1-q_2/q_1$ tenglama bilan aniqlanadigan siklning foydali ish koeffitsiyenti 12'3'4 siklda katta bo‘ladi. Bu shuni anglatadiki, porshenli ichki yonuvdvigateli siklining foydali ish koeffitsiyenti siqish darajasi ortishi bilan ortadi. Biroq Otto siklida siqish darajasini oshirish imkoniyatlari hozirgi kunda amalda tugab bo‘lgan. Bunday sikllarda siqish darajasi 10-12 ga teng va porshen siqish chizig‘ida M_1 ichki o‘lik nuqtaga etib kelguncha yoqilg‘i aralashmasi o‘z-o‘zidan alangalanishi tufayli uni yanada oshirishning iloji yo‘q. YOqilg‘ining o‘z-o‘zidan alangalanishi siqish jarayonida aralashmaning harorati o‘ta ko‘tarilib ketishi tufayli ham sodir bo‘lishi mumkin.

Agar dvigatelning silindrida yoqilg‘i aralashmasi emas, sof havo siqilsa, zaruriy miqdordagi yoqilg‘i esa silindrga siqish jarayonining oxirida kiritilsa, siqish darajasini anchagina oshirish mumkin, bunda havoning harorati etarlicha yuqoriga ko‘tariladi (taxminan 500 – 600ºC) va purkalgan yoqilg‘ining o‘z-o‘zidan alangalanishini ta’minlaydi va shu tariqa alanga oldirish zapaliga ega bo‘lish zaruratini istisno qiladi. Bunday ideallashtirilgan sikl Dizel sikli yoki asta-sekin yonish sikli deb ataladi, chunki yoqilg‘ini purkash, uning havo bilan aralashishi va yonish jarayonining o‘zi siklda ma’lum bir vaqtni talab qiladi. Dizel sikli (14.4,a-rasm) adiabatik siqish (1–2 chiziq), issiqlikni

izobarik olib kelish (2–3 chiziq), adiabatik kengayish (3–4 chiziq) va issiqlikni izoxorik olib ketishdan (4–1 chiziq) tashkil topadi, bunday sikllarda eng foydali siqish darajasi 14 – 16 ga teng bo‘ladi.

Otto va Dizel sikllarini *T–s* diagramma yordamida 1 va 4 nuqtalarning bir xil parametrlarida o‘zaro taqqoslaymiz (13.4,b- rasm). Agar bu sikllarda ε siqish darajasi bir xil bo‘lsa va q_2 olib ketiladigan issiqlik miqdori bir xil bo‘lsa, 1 va 4 nuqtalarda ishchi jismning parametrlarining tengligi tufayli (1465 maydon), Otto siklining, ya’ni yoqilg‘i tezkor yonadigan siklning foydali ish koeffitsiyenti Dizel siklining foydali ish koeffitsiyentiga qaraganda katta bo‘ladi. Haqiqatan ham, *T–s* koordinatalarda izoxora izobaraga qaraganda tikroq bo‘ladi, u holda 2–3' izoxora bo‘yicha olib kelinadigan q_1 issiqlik miqdori (523'6 maydon) 2–3 izobara bo‘yicha olib kelinadigan issiqlik miqdoriga (5236 maydon) qaraganda katta bo‘ladi. SHundan kelib chiqqan holda, $\eta_t = 1 - q_2/q_1$ tenglama bilan aniqlanadigan siklning foydali ish koeffitsiyenti q_2 ning doimiy qiymatida q_1 kattalik qanchalik katta bo‘lsa – shunchalik yuqori bo‘ladi.



a) b)

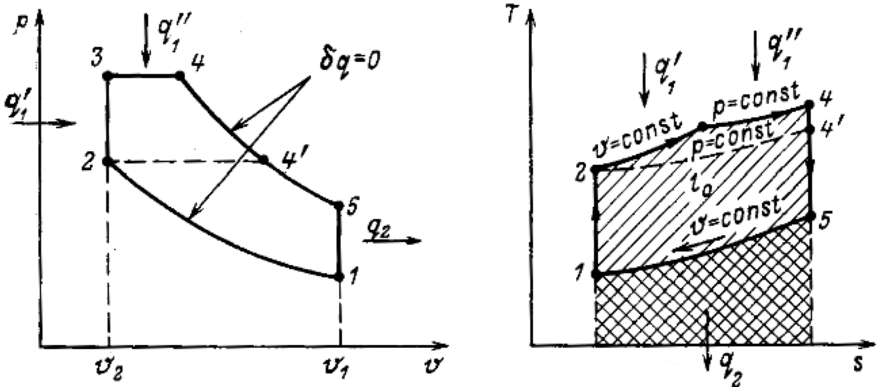
13.4-rasm. Dizel siklining *p-v* (a) va *T-s* (b) diagrammalarda ko‘rinishi

Endi bu sikllarni bir xil, dvigatelning silindrlarida maksimal mumkin bo‘lgan bosimlarda taqqoslaymiz, shunda ularda 2 nuqta emas, 3 nuqta umumiy bo‘lib hisoblanadi (12'34 va 1234 sikllar). Har ikkala siklda q_2 issiqlikni olib ketish yana bir xil bo‘ladi (1465

maydon). Bu holda Dizel siklida 2-3 izobara bo‘yicha olib kelingan q_1 issiqlik miqdori Otto siklida 2'–3 izoxora bo‘yicha olib kelingan issiqlik miqdoriga qaraganda katta bo‘ladi, va shundan kelib chiqqan holda maksimal mumkin bo‘lgan bir xil bosim sharoitlarida Dizel siklining foydali ish koeffitsiyenti Otto siklining foydali ish koeffitsiyentiga qaraganda katta bo‘ladi.

Yoqilg‘ini berishni shunday amalga oshirish mumkinki, bunda uning bir qismi doimiy hajmda yonadi, boshqa qismi esa – o‘zgarmas bosimda yonadi. Bunday sikl yoqilg‘i aralash yonadigan sikl deb ataladi (13.5-rasm). Ko‘rib chiqilgan sikllarni taqqoslashdan shu narsa ko‘rinadiki, doimiy hajmda va o‘zgarmas bosimda yonish sikllari aralash siklning xususiy holatlari bo‘lib hisoblanadi.

13.1,b-rasmdagi diagrammadan ko‘rinib turibdiki, bu sikl foydali ish koeffitsiyenti bo‘yicha - bir xil ε siqish darajasi sharoitlarida taqqoslanganda ham, dvigatelning silindrida bir xil maksimal bosim sharoitlarida taqqoslanganda ham - Otto va Dizel sikllari o‘rtasidagi oraliq holatni egallaydi. Issiqlik aralash beriladigan siklni qo‘llash optimal siqish darajasida, yoqilg‘ini berish dastlab izoxora bo‘yicha borganda maksimal bosimning bir qadar ortishi hisobiga Dizel siklining foydali ish koeffitsiyentiga qaraganda biroz yuqoriroq foydali ish koeffitsiyentini olish imkonini beradi.



a) b)

13.5-rasm. *p*-*v* (a) va *T*-*s* (b) koordinatalarda aralash yonish sikli.

Aralash siklning foydali ish koeffitsiyentini aniqlash uchun tenglamani chiqaramiz, bunda uni qaytar sikl deb hisoblaymiz va

siklda ishchi jismning issiqlik sig‘imlari o‘zgarmasdan qoladi deb taxmin qilamiz. 2–3 izoxorada olib kelinadigan issiqlik miqdori (13.1-rasmga qaralsin) termodinamikaning birinchi asosining tenglamasiga ko‘ra $q_1^{/} = c_\upsilon(T_3 - T_2)$ bo‘ladi, 3–4 jarayonda esa $q_1^{//} = c_p(T_4 - T_3)$ bo‘ladi. 5-1 izoxorada q_2 olib ketiladigan issiqlik miqdori $q_2 = c_\upsilon(T_5 - T_1)$ bo‘ladi. SHundan kelib chiqqan holda, l_0 olingan foydali ishning q_1 olib kelingan issiqlik miqdoriga nisbati sifatida aniqlanadigan siklning foydali ish koeffitsiyenti quyidagiga teng bo‘ladi:

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1^{/} + q_1^{//}} = \\ = 1 - \frac{c_\upsilon(T_5 - T_1)}{c_\upsilon(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)}. \quad (13.2)$$

c_υ ga qisqartirish va T_1 va T_2 ni qavsdan tashqariga chiqarish bilan quyidagini olamiz:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2}\frac{\frac{T_5}{T_1} - 1}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right) + \frac{c_p}{c_\upsilon}\left(\frac{T_4}{T_2} - \frac{T_3}{T_2}\right)}. \quad (13.3)$$

Siklning quyidagi parametrlarini ko‘rib chiqamiz: $\lambda = p_3/p_2$ izoxorada issiqlikni olib kelish jarayonida bosimning ortish darajasi va 4 va 3 nuqtalarda ishchi jismning hajmlarining $\rho = \upsilon_4/\upsilon_3$ nisbati, u izobarik kengayish darajasini tavsiflaydi (13.5,a-rasmga qaralsin). $\varepsilon = \upsilon_1/\upsilon_2$ ekanligini hisobga olish bilan ideal gaz uchun tenglamada *(pv=RT)* haroratlar nisbati quyidagini tashkil qiladi:

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} = \lambda; \frac{T_4}{T_2} = \frac{T_4}{T_3}\frac{T_3}{T_2} = \frac{\upsilon_4}{\upsilon_3}\frac{T_3}{T_2} = \rho\lambda. \quad (13.4)$$

p=k ideal gazning adiabatasi uchun yozilgan tenglamadan foydalanish bilan T_5/T_1 va T_1/T_2 haroratlar nisbatini quyidagi ko‘rinishga keltirish mumkin ($\upsilon_5 = \upsilon_1$; $\upsilon_3 = \upsilon_2$ va $p_3 = p_4$ bo‘lganda)

$$\frac{T_5}{T_1} = \frac{p_5}{p_1} = \frac{p_4 \upsilon^k{}_4}{\upsilon^k{}_5} : \frac{p_2 \upsilon^k{}_2}{\upsilon^k{}_1} = \frac{p_3}{p_2}\left(\frac{\upsilon_4}{\upsilon_3}\right)^k = \lambda.\rho^k; \\ \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}\right)^{k-1} = \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}. \quad (13.5)$$

(14.4 va 14.5) tenglamalarni (14.3) tenglamaga o‘rniga qo‘yish bilan quyidagini olamiz:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda\rho^k - 1}{\lambda - 1 - k\lambda(\rho - 1)}. \qquad (13.6)$$

Tenglamadan ko‘rinib turibdiki, aralash siklning foydali ish koeffitsiyenti ε vai λ lotishi bilan va ρ kamayishi bilan ortadi. Agar ρ=1 bo‘lsa, u holda aralash sikl Otto sikliga aylanadi va

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}. \qquad (13.7)$$

bo‘ladi.

Agar λ=1 deb qabul qilinsa, u holda aralash sikl Dizel sikliga aylanadi

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)}. \qquad (13.8)$$

Porshenli ichki yonuvdvigatellarining sikllarini tahlil qilish ularni o‘zaro taqqoslash, sikllarning tejamkorlagini oshirishning istiqbollarini aniqlash, tashqi yuklama, siqish darajasi va hokazolar o‘zgarganda sikllarning tejamkorligining o‘zgarish xarakterini baholash imkonini beradi.

Masalalar

75. Porshenli ichki yonuv dvigateli V=const da yoqilg‘ini yonish sikli bo‘yicha ishlaydi. SHu siklni har bir nuqtasidagi parametrlarini, olingan ishni, keltirilgan va olib ketilgan issiqlikni termik FIKni aniqlang, agar P_1=1 bar, t_1=20^{0}C, ε=3,6; λ=3,33; k=1,4 bo‘lsa. Ishchi jism – havo. Issiqlik sig‘imini o‘zgarmas deb hisoblansin.

Echish: Hisoblashni 1 kg havo uchun olib boramiz:

1-nuqta:

P_1=1 bar, t_1=20^{0}C

Holat tenglamasidan P_1V_1= PT_1

$$V_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 293}{1 \cdot 10^5} = 0{,}84 \text{ m}^3/\text{kg}$$

2-nuqta:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = 3{,}6 \qquad V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon} = \frac{0{,}84}{3{,}6} = 0{,}233 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Adiabatik siqilishdagi harorat

$T_2 = T_1(\frac{V_1}{V_2})^{\kappa-1}$=293·3,6^{0,4}=489K

t_2=216^{0}C

$P_2 = \frac{RT_2}{V_2} = \frac{287 \cdot 489}{0,233} = 6,02$ bar

3-nuqta:

$V_3=V_2$=0,233 m^3/kg.

Izoxor jarayonda parametrlar orasidagi bog'lanishga asoslanib,

$\frac{P_3}{P_2} = \frac{T_3}{T_2} = \lambda = 3,33$

$P_3=P_2\lambda$=6,02·3,33=20 bar.

$T_3=T_2\lambda$=489·3,33=1628 K, t_3=1355^{0}C

4-nuqta:

$V_4=V_1$=0,84 m^3/kg.

$T_4 == T_3(\frac{V_3}{V_4})^{k-1} = T_3(\frac{V_2}{V_1})^{k-1} = 1628\frac{1}{3,6^{0,4}} = 976$ K

$P_4 = P_1\frac{T_4}{T_1} = 1\frac{976}{293} = 3,33$ bar

$q_1=C_V(T_3-T_2)$=(20,93/28,96)(1628-489)=825 kJ/kg

$q_2=C_V(T_4-T_1)$=(20,93/28,96)(976-293)=495 kJ/kg

Termik FIK

η_t=(825-495)/825=0,4= 40%

$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = 1 - \frac{1}{3,6^{0,4}} = 0,4 = 40\%$

Sikl ishi:

$\ell_0=q_1-q_2$=330kJ/kg.

76. V=const da issiqlik keltiradigan porshenli ichki yonuv dvigatelining siqilish darajasi ε=5, bosimni oshirish darajasi λ=1,5. Ishchi jism - havo. Issiqlik sig'imini o'zgarmas deb hisoblang, shu siklning FIKni aniqlang.

Javob: η_t=0,476.

77. P=const bo'lganda issiqlik keltiruvchi sikl bilan ishlaydigan siklning xarakterli nuqtalardagi parametrlarini, foydali ishni, termik FIKni, keltirilgan va olib ketilgan issiqlikni aniqlang, agar P_1=1 bar, t_1=20^{0}C, ε=12,7, k=1,4 bo'lsa. Ishchi jism–havo. Issiqlik sig'imini o'zgarmas deb hisoblang.

Javob: v_1=0,84 m^3/kg; P_2=35,1 bar; v_2= 0,0661 m^3/kg; t_2=536^{0}C;
T_3=1345 K; P_3=35,1 bar; R_4= 2,64 m^3/kg; t_4=500^{0}C;
q_1=818 kJ/kg; q_2=347 kJ/kg;

ℓ_0= 471 kJ/kg η_t=57,6%.

78. Aralashgan holda issiqlik keltiruvchi ichki yonuv dvigatelining sikli berilgan. Ishchi jism – havo. Uning boshlang‘ich parametrlari P_1=0,1 at, t_1 =30^{0}C, ε=4,6, λ=2,0, ρ=1,2.

Siklning har bir nuqtasidagi parametrlar keltirilgan issiqlik, ish, termik FIK aniqlansin, bunda issiqlik sig‘imi o‘zgarmas deb hisoblansin.

Javob: v_1=0,87 m^3/kg; v_2=0,124 m^3/kg; v_4=0,149 m^3/kg;
P_2=1,52 MPa; P_3=3,05 MPa; P_5=0,26 MPa;
t_3 =1047^{0}C; t_4 =1311^{0}C; t_5 =511^{0}C;
q_1=744,2 kJ/kg; η_t=0,532; ℓ_0=396 kJ/kg.

79. P=const bo‘lganda issiqlik keltiruvchi sikl berilgan. Ishchi jism – havo, uning parametrlari P_1=100 kPa, ε=14, ρ=1,5, k=1,4. Silindrning diametri d=0,3 m, porshenning siljishi S=0,45 m.

Siklning har bir nuqtasidagi parametrlar va FIKni aniqlang. Issiqlik sig‘imini o‘zgarmas deb hisoblang.

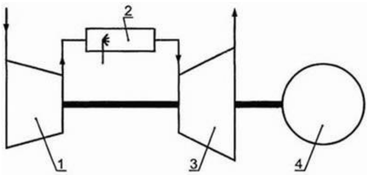
Javob: V_1= V_4=0,0341 m^3; V_2=0,00244 m^3; V_3=0,00366 m^3;
P_2=4,02 MPa; P_4=0,176 MPa; η_t=0,65.

Nazorat savollari

1. Issiqlik dvigatellarining termodinamik sikllarini tavsiflaydigan parametrlarni aytib bering.
2. Ichki yonuv dvigatellarini ishlash uslubini tushuntirib bering.
3. Ichki yonuv dvigatellari qanday sikllarda ishlaydi?
4. O‘zgarmas hajmda issiqlik olib kelinadigan sikl qaysi jarayonlardan iborat bo‘ladi va qanday sikl deb ataladi?
5. O‘zgarmas bosimda issiqlik olib kelinadigan sikl qaysi jarayonlardan iborat bo‘ladi va qanday sikl deb ataladi?
6. Aralash yonadigan sikl deb nimaga aytiladi?
7. Har bir siklning foydali ish koeffitsiyenti nimalarga bog‘liqligini tushuntirib bering.

14. Gaz-turbina qurilmalarining (GTQ) sikllari

Gaz-turbinali qurilma deb shunday dvigatelni atash qabul qilinganki, unda ishchi jism sifatida kondensatsiyalanmaydigan gazdan (havo, yoqilg‘ining yonish mahsulotlari), tortish dvigateli sifatida esa gaz turbinasidan foydalaniladi.



a) b)

14.1-rasm. Gaz-turbina qurilmasining umumiy ko‘rinishi (a) va prinsipial chizmasi (b)

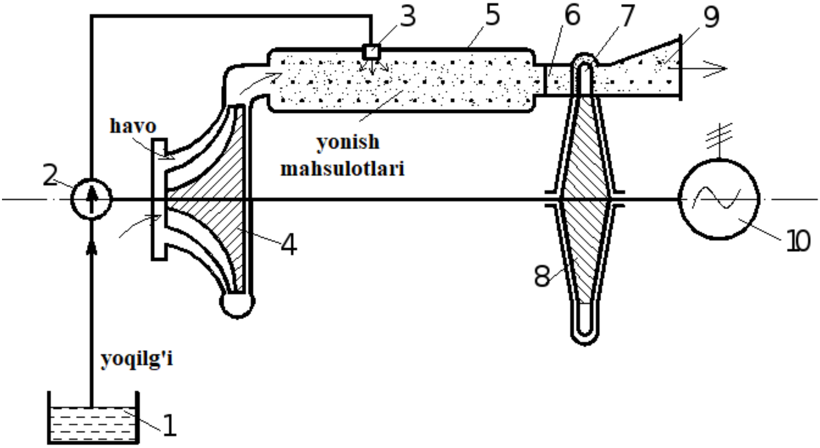
Turbina atamasi lotincha turbo – volchok so‘zidan kelib chiqqan. Ularda siqish, issiqlikni olib kelish va kengayish jarayonlari xuddi o‘sha bitta silindrda amalga oshadigan porshenli ichki yonuvdvigatellaridan farqli o‘laroq, gaz-turbinali qurilmalarda bu jarayonlar qurilmaning ishchi jismning oqimi bo‘ylab ketma-ket joylashgan turli elementlarida sodir bo‘ladi (14.1-rasm).

14.1. Bosim o‘zgarmas jarayonidagi issiqlik keltiruvchi gaz turbina qurilmasining sikli

Eng oddiy chizmali gaz-turbinali qurilma quyidagicha ishlaydi: tashqi havo 1 kompressorning kirishiga kirib keladi, bu yerda 1–2 adiabata bo‘yicha r_2 bosimgacha siqiladi (14.3-rasm). Kompressorda siqilgandan keyin havo yonish kamerasiga kirib keladi (14.2-rasmga qaralsin), bu erga bir paytning o‘zida suyuq yoki gazsimon yoqilg‘i beriladi. YOqilg‘ini yoqishda hosil bo‘ladigan yonish mahsulotlari 3 gaz turbinasiga kirib keladi, bu yerda 3–4 adiabata bo‘yicha (14.2-rasmga qaralsin) amalda r_1 atmosfera bosimigacha kengayadi. Ishlab bo‘lgan yonish mahsulotlari atmosferaga chiqarib yuboriladi. Gaz

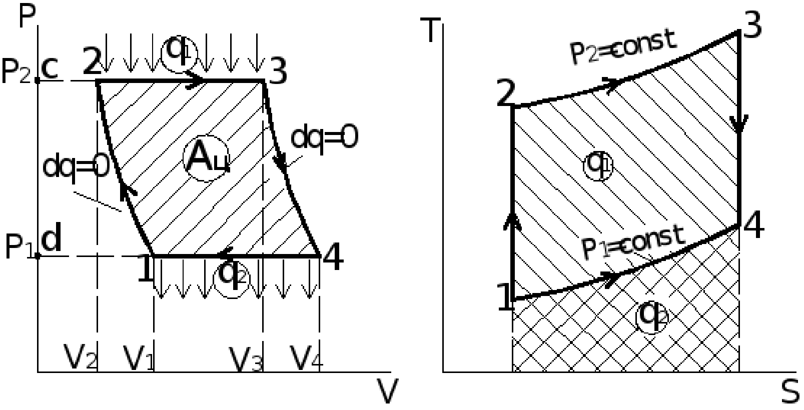
turbinasida olinadigan ish qisman (ishning katta, taxminan 2/3 qismi) 1 kompressorni yuritishga va 4 foydali yuklamani (nasos, generator va hokazolar) yuritishga ketadi.

Gaz-turbinali qurilmalarda, xuddi ichki yonuv dvigatellaridagi kabi issiqlikni ishchi jismga olib kelishni oʻzgarmas bosimda yoki doimiy hajmda amalga oshirish mumkin. Doimiy bosimda issiqlik uzluksiz oqimli siqilgan havo bilan olib kelinadi, doimiy hajmda esa – maxsus konstruksiyali yonish kamerasida olib kelinadi, u davriy ravishda gaz turbinasidan shunday ajratiladiki, bunda ishchi jismning oqimi pulsatsiyalanadigan boʻlib qoladi.



14.2-расм. P =const boʻlganda issiqlik keltiruvchi siklning chizmasi

Ba’zi bir afzalliklariga qaramasdan (kompressorda siqish darajasi teng darajada oshirilganda gaz-turbinali qurilmaning oshirilgan foydali ish koeffitsiyenti), issiqlik doimiy hajmda olib kelinadigan gaz-turbinali qurilmalar asosan yonish kamerasining murakkab konstruksiyasi tufayli hozircha amaliy qoʻllanishga ega boʻlmagan.



a) b)

14.3-расм. P =const bo‘lganda issiqlik keltiruvchi siklning
P-V (a) va T-s (b) diagrammalari

Gaz-turbinali qurilmaning ideal siklining foydali ish koeffitsiyenti quyidagi nisbat bilan aniqlanadi:

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1}, \qquad (14.1)$$

bu yerda q_1 – 2-3 izobarada olib kelingan issiqlik miqdori, $q_1 = c_p(T_3 - T_2)$; q_2 – yonish mahsulotlarini chiqarib yuborishda 4-1 izobarada olib ketilgan issiqlik miqdori, $q_2 = c_p(T_4 - T_1)$, c_p - yonish mahsulotlarining issiqlik sig‘imi, ifodada u doimiy deb qabul qilingan.

Gaz-turbinali qurilmalar uchun, porshenli ichki yonuv dvigatellaridan farqli o‘laroq, siqish darajasi parametrining o‘rniga $S = p_2/p_1$ kompressorda bosimning ortish darajasini tavsiflaydigan parametr kiritiladi.

Bu shu bilan shartlanadiki, kompressordan oldingi r_1 va undan keyingi r_2 bosimni o‘lchash siklning ana shu nuqtalarida υ_2 va υ_2 havoning solishtirma hajmlarini o‘lchashga qaraganda anchagina oson. Tenglamadagi haroratlar nisbatini ideal gaz uchun adiabata tenglamasidan foydalanish bilan kompressor uchun S siqish bosimlarining nisbati orqali ifodalaymiz

$$\frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}=\frac{1}{\frac{k-1}{k}};$$

$$\frac{T_4}{T_1}=\frac{T_4}{T_3}\frac{T_3}{T_2}\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}}\cdot\frac{T_3}{T_2}\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}. \qquad (14.2)$$

$p_3=p_2$ va $p_4=p_1$ ekanligi sababli oxirgi tenglamadan $T_4/T_1=T_3/T_2$ ekanligi kelib chiqadi. SHuni hisobga olish bilan tenglama quyidagi ko‘rinishni qabul qiladi:

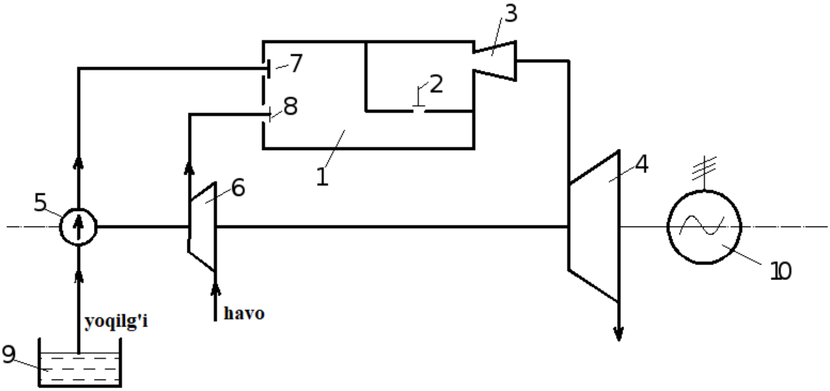
$$\eta_t=1-\frac{T_1}{T_2}=1-\frac{1}{C^{\frac{k-1}{k}}}. \qquad (14.3)$$

Tenglamadan shu kelib chiqadiki, *S* siqish bosimlarining nisbati ortishi bilan ideal siklning foydali ish koeffitsiyenti uzluksiz ortadi.

14.2. Hajm o‘zgarmas jarayonidagi issiqlik keltiruvchi gaz turbina qurilmasining sikli

Bu siklning chizma tasviri 14.4-rasmda keltirilgan.

Kompressorda siqilgan havo ressiver orqali havo klapanidan yonish kamerasiga kelib tushadi. U erga yoqilg‘i nasosidan yoqilg‘i tushib, yonish jarayoni bo‘ladi, so‘ngra yonishda hosil bo‘lgan mahsulotlar gaz turbinasiga tushib, ishlatilib bo‘lingan gazlar tashqariga chiqarib yuboriladi. Bunday siklning P-V va T-S diagrammasini quyidagi chizmada ko‘ramiz.



14.4-rasm. V=const GTQ sining chizma tasviri

Bu siklning xarakteristikalari bo‘lib bosimni oshirish darajasi $\beta = \frac{P_2}{P_1}$ va qo‘shimcha bosimni oshirish darajasi $\lambda = \frac{P_3}{P_2}$ hisoblanadi.

Keltirilgan issiqlik miqdori:

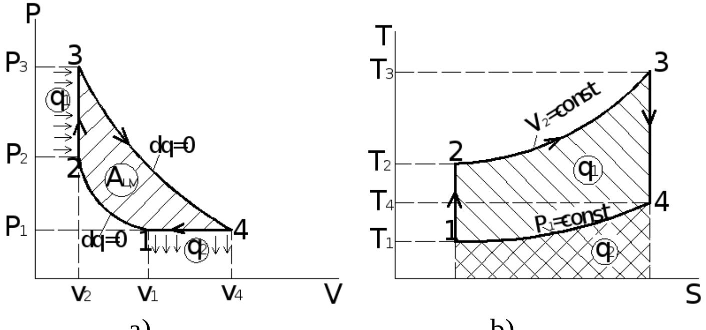
$$q_1 = c_V\,(T_3 - T_2) \tag{14.4}$$

Olib ketilgan issiqlik miqdori esa

$$q_2 = c_p\,(T_4 - T_1) \tag{14.5}$$

q_1 va q_2 ning qiymatlarini FIK aniqlash ifodasiga qo‘yib, quyidagilarni olamiz:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{C_p (T_4 - T_1)}{C_V (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{\kappa (T_4 - T_1)}{T_3 - T_2} \tag{14.6}$$



a) b)

14.5-rasm. V=const bo‘lganda issiqlik keltiruvchi siklning P-V va T-s diagrammasi

T_2 , T_3 , T_4 haroratlarni T_1 orqali ifodalaymiz.

1-2 adiabata orqali:

$$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=\beta^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} ,$$

bundan:

$$T_2 = T_1\ \beta^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} , \qquad (14.7)$$

2-3 izoxora orqali:

$$\frac{T_3}{T_2}=\frac{P_3}{P_2}=\lambda ,$$

bundan:

$$T_3=T_2\cdot\lambda \text{ va } T_2= T_1\ \beta^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\cdot\lambda , \qquad (14.8)$$

3-4 adiabata orqali:

$$\frac{T_4}{T_3}=\left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=\left(\frac{P_1}{P_1\beta\lambda}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=\frac{1}{\beta\lambda^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} , \qquad (14.9)$$

bundan:

$$T_4 = T_3\left(\frac{1}{\beta\lambda}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1\ \beta^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\ \lambda\ \left(\frac{1}{\beta\lambda}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \text{ va}$$

$$T_4 =T_1\ \lambda^{\frac{1}{\kappa}} \qquad (14.10)$$

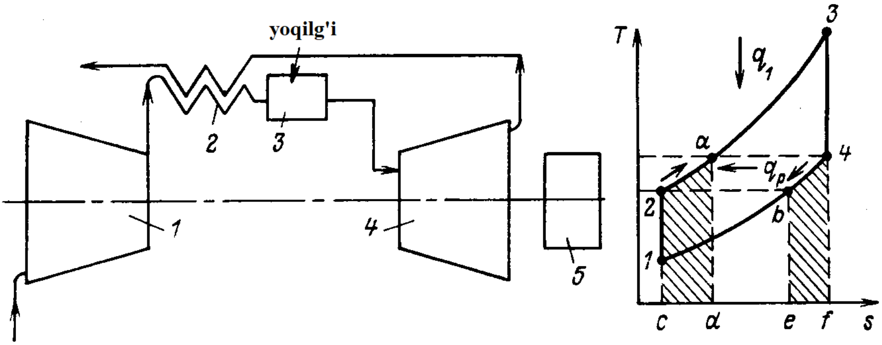
Shu qiymatlarni FIK ifodasiga qo‘yish bilan quyidagini hosil qilamiz.

$$\eta_t = 1-\frac{\kappa(\lambda^{\frac{1}{\kappa}}-1)}{\beta^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}(\lambda-1)} , \qquad (14.11)$$

(14.11) ifodadan ko‘rinib turibdiki, siklning FIK k, β, λ kattaliklarning ortishi bilan ortadi.

Gaz-turbinali qurilmaning chizmasini murakkablashtirish, xususan, chiqib ketayotgan gazlarning issiqligini regeneratsiyalashni kiritish bilan gaz-turbinali qurilmaning siklining samaradorligini oshirish mumkin (14.3-rasm). Bu chizmada yonish mahsulotlari 4 gaz turbina-sidan keyin atmosferaga chiqarib yuborishdan oldin 2 regeneratordan o‘tadi, bu yerda 1 kompressor bilan 3 yonish kamerasiga beriladigan siqilgan havo isitiladi. SHu tariqa, gazlarning turbinadan oldingi T_3 doimiy haroratida siqilgan havo kompressordan keyin 2-3 izobaraning 2 - a uchastkasida turbinadan chiqib ketayotgan gazlar bilan isitiladi va birgina a - 3 uchastkada u yoqilg‘ini yoqish hisobiga isitiladi. *2abc* va

b4fe maydonlar mos ravishda havoga olib kelinadigan issiqlik miqdori va issiqlikni regeneratsiyalash jarayonida yonish mahsulotlaridan olinadigan issiqlik miqdorini tavsiflaydi. SHunga mos ravishda,



a) b)

14.3-rasm. Issiqlikni regeneratsiyalashga ega bo‘lgan gaz-turbina qurilmasi chizmasi va T-s diagrammada ko‘rinishi

olib kelinadigan issiqlik miqdori *2abc* maydonning kattaligiga kamayadi, 1234 maydon bilan aniqlanadigan siklning ishi esa o‘zgarmasdan qoladi. Ana shu 5 gaz haydagichning valida issiqlikni regeneratsiyalashga ega bo‘lgan gaz-turbinali qurilmaning siklining foydali ish koeffitsiyenti chiqib ketayotgan gazlarning issiqligini regeneratsiyalashga ega bo‘lmagan gaz-turbinali qurilmaning foydali ish koeffitsiyentiga qaraganda ortishiga olib keladi.

Masalalar

80. Bosim o‘zgarmas bo‘lgandagi gaz turbina qurilmasining (P=const) siklini har bir nuqtasidagi parametrlarini, foydali ishini, keltirilgan va olib ketilgan issiqlikni, FIKni aniqlang, agar P_1=1 bar, $t_1=27^0$C, $t_2=700^0$C, $\lambda=P_2/P_1=10$; k=1,4 berilgan bo‘lsa. Ishchi jism – havo. Issiqlik sig‘imini o‘zgarmas deb hisoblang.

Echish:

1-nuqta: $V_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 300}{1 \cdot 10^6} = 0{,}861$ m^3/kg;

2-nuqta: $\frac{T_2}{T_1} = (\frac{P_2}{P_1})^{\frac{k-1}{k}}$; $T_2 = T_1(\frac{P_2}{P_1})^{\frac{k-1}{k}} = T_1\lambda^{\frac{k-1}{k}}$

T_2=300 $10^{0,4/1,4}$=300 1,93=579 K

$t_2=306^0$C

$\frac{P_2}{P} = \lambda$ $P_2 = P_1\ \lambda = 1 \cdot 10 = 10$ bar

$P_2V_2 = RT_2$ $V_2 = \frac{RT_2}{P_2} = \frac{287 \cdot 579}{10 \cdot 10^5} = 0{,}166$ m^3/kg

3-nuqta: $T_3 = 700 + 273 = 973$ K

$P_3 = P_2 = 10$ bar

$V_3 = V_2 \frac{T_3}{T_2} = 0{,}166 \frac{973}{579} = 0{,}279$ m^3/kg

4-nuqta: $\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_1}{T_4} : \frac{973}{T_4} = \frac{579}{300}$

$T_4 = \frac{973 \cdot 300}{579} = 504\ K$

$t_4 = 229^0$C $P_4 = P_1 = 1$ bar

$\frac{V_4}{V_1} = \frac{T_4}{T_1}$; $V_4 = V_1 \frac{T_4}{T_1} = 0{,}861 \cdot \frac{504}{300} = 1{,}45$ m^3/kg

Issiqlik miqdori:

$q_1 = q_{2\text{-}3} = C_p(T_3 - T_2) = (29{,}31/28{,}96)(973 - 579) = 399$ kJ/kg

$q_2 = q_{4\text{-}1} = C_p(T_4 - T_1) = (29{,}31/28{,}96)(500 - 300) = 202$kJ/kg

Siklning ishi:

$\ell_0 = q_1 - q_2 = 399 - 202 = 197$ kJ/kg

Siklning termik FIK:

$\eta_t = 1 - q_2/q_1 = 1 - (202/399) = 0{,}494$

81. Gaz turbinasi P=const bo‘lganda issiqlik keltirish bo‘yicha ishlaydi. Bunda quyidagi parametrlar aniq: $P_1=1$ bar, $t_1=40^0$C, $t_4=400^0$C, yana bosimni oshirish darajasi $\lambda=8$; Ishchi jism–havo. Xarakterli nuqtalardagi parametrlar, keltirilgan va olib ketilgan issiqlik, siklning bajarilishidagi ish va termik FIKni aniqlang. Issiqlik sig‘imini o‘zgarmas deb hisoblang.

$V_2 = 0{,}204$ m^3/kg; $t_2 = 297^0$C: $V_3 = 0{,}438$ m^3/kg; $t_3 = 948^0$C;

$V_4 = 1{,}93$ m^3/kg; $q_1 = 659$ kJ/kg: $q_2 = 364$ kJ/kg: $\ell_0 = 296$ kJ/kg

$\eta_t = 0{,}45$

Javob: $V_1=0{,}9$ m^3/kg; $R_2=8$ bar

82. Gaz turbina qurilmasi P=const sikli bo‘yicha ishlaydi. Quyidagi parametrlar berilgan: $t_1=30^0$C, $t_4=400^0$C, $\lambda=P_2/P_1=4$. Ishchi jism–havo. SHu siklning termik FIKni aniqlang.

Javob: $\eta_t=0{,}585$.

83. R=const issiqlik keltiruvchi GTQning FIKni aniqlang, bunda uning bosimini oshirish darajasi 1) $\beta_1=5$; 2) $\beta_2=10$; 3) $\beta_3=20$ ga teng.

Ishchi jismni havoning xossalariga ega bo‘lgan jism deb hisoblang. Adiabata ko‘rsatkichi k=1,4.

Javob: η_{t1}=0,369; η_{t2}=0,482; η_{t3}=0,575.

84. Gaz turbinasi P=const bo‘lganda issiqlik keltiruvchi sikl bilan ishlaydi, bosimni oshirish darajasi β=12.

Ikkita holat uchun shu siklning FIKni aniqlang:

1) ishchi jism – havo; 2) ishchi jism – geliy.

Javob: η_t=0,508; η_t=0,630.

85. Gaz turbina qurilmasining bug‘ turbinasiga parametrlari R_3 =1,0 MPa, t_1=700 ^{0}C bo‘lgan geliy kiradi. Turbinaning ichki nisbiy FIK 0,86, turbinadan keyingi bosim R_4=0,1 MPa ga teng. Agar turbinaning haqiqiy quvvati N_t=40 MVt bo‘lsa, soatiga sarflangan issiqlik va geliyning turbinadan chiqishdagi haroratini aniqlang.

Javob: t=196 ^{0}S; m_t=55,1·10^3 kg/s.

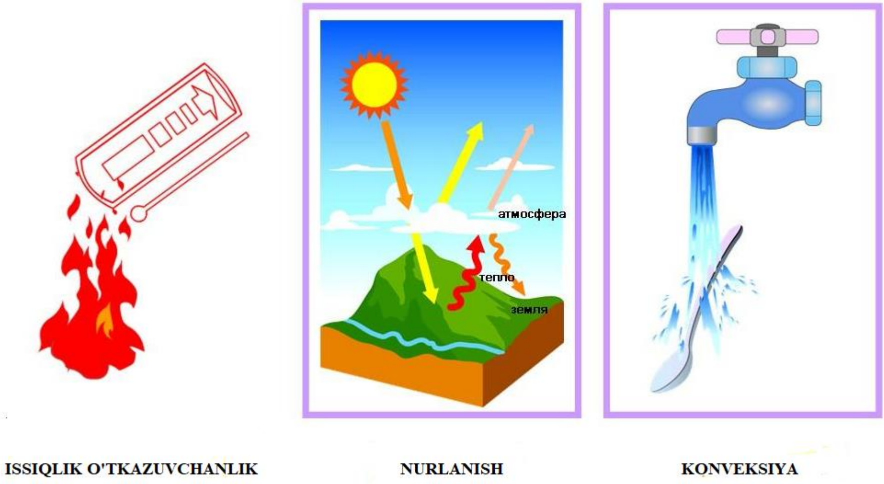
Nazorat savollari

1. Gaz-turbinali qurilma deb qanday qurilmalarga aytiladi?
2. Bosim o‘zgarmas jarayonidagi issiqlik keltiruvchi gaz turbina qurilmasining siklini tushuntirib bering.
3. Hajm o‘zgarmas jarayonidagi issiqlik keltiruvchi gaz turbina qurilmasining siklini tushuntirib bering.
4. Siklning xarakteristikalari to‘g‘risida ma’lumot bering.
5. Issiqlikni regeneratsiyalashga ega bo‘lgan gaz-turbina qurilmasi chizmasi tushuntirib bering.
6. Har bir siklning foydali ish koeffitsiyenti nimalarga bog‘liqligini tushuntirib bering.

15. Issiqlik uzatilishi asoslari

Issiqlik uzatilishi (issiqlik almashinuvi nazariyasi) – jismlar o‘rtasida issiqlik uzatilish jarayonlari, issiqlikning kenglikda (makonda) tarqalishi va qattiq, suyuq va gazsimon jismlarda haroratning taqsimlanishini o‘rganuvchi fandir. Ularning turli kechish sharoitlarida bu jarayonlarni o‘rganish issiqlik almashinishi to‘g‘risidagi ta’limotning mazmunini tashkil qiladi.

Issiqlik uzatilishining uchta asosiy shakllari issiqlik o‘tkazuvchanlik, konvektiv issiqlik almashinuvi va nurlanish mavjud.



Turlicha haroratga ega bo‘lgan ikkita jism bir-biriga tekkanda bu jismlar zarrachalarining (molekulalar, atomlar, erkin elektronlar) harakat energiyasini almashinishi sodir bo‘ladi, natijada pastroq haroratga ega bo‘lgan jismda zarrachalarning harakatining intensivligi ortadi, yuqoriroq haroratga ega bo‘lgan jismda zarrachalarning harakatining intensivligi esa kamayadi: pastroq haroratga ega bo‘lgan jism qiziydi, boshqasi esa – sovuydi. SHundan kelib chiqqan holda, ikkita jism o‘rtasida yoki moddiy muhit bilan to‘ldirilgan kenglikning ikkita sohasi o‘rtasida issiqlik almashinishi jarayoni vujudga kelishi uchun haroratlar farqi bo‘lishi zarur.

Issiqlikning moddiy muhitda uning zarrachalarining issiqlik harakati bilan chaqiriladigan tarqalishi bilan bir qatorda issiqlikning nurlanish vositasida ko‘chib o‘tishi ham kuzatiladi, bunda energiya bir jismdan boshqasiga elektromagnitik to‘lqinlar vositasida uzatiladi.

Issiqlik uzatilishining uchta asosiy shakllari ajratiladi: issiqlik o‘tkazuvchanlik, konvektiv issiqlik almashinuvi va nurli issiqlik almashinishi.

Issiqlik o‘tkazuvchanlik o‘zida issiqlikning jismning turlicha haroratga ega bo‘lgan zarrachalarini bir-biriga bevosita tegishi yo‘li bilan uzatilishini taqdim qiladi. Bunda issiqlik almashinishi jarayoni bir elementar zarrachalarning mikroharakat energiyasining boshqasiga uzatilishi oqibatida sodir bo‘ladi.

Konvektiv issiqlik almashinuvi deb kenglikda suyuqlik (tomchili suyuqlik yoki gaz) zarrachalarining ko‘chishi bilan amalga oshadigan issiqlik uzatilishiga aytiladi. Suyuqlikning turlicha qizigan zarrachalari kenglikda ko‘chganda ularning bir-biriga bevosita tegishi sodir bo‘ladi, shu sababli bu yerda issiqlik o‘tkazuvchanlik o‘rinli bo‘ladi. SHundan kelib chiqqan holda konvektiv issiqlik almashinuvi o‘zida ikkita jarayon – konveksiya va issiqlik o‘tkazuvchanlikning birgalikdagi harakatini taqdim qiladi.

Suyuqlikning harakatiga bog‘liq ravishda *suyuqlikning erkin harakatida konvektiv issiqlik almashinuvi* (erkin konveksiya) va *suyuqlikning majburiy harakatida konvektiv issiqlik almashinuvi* (majburiy konveksiya) ajratiladi.

Erkin konveksiya suyuqlik yoki gazning notekis qizigan qatlamlarining tortishish kuchlari maydonidagi zichliklari farqi oqibatida vujudga keladi. Erkin konveksiyaning vujudga kelishi va uning intensivligi haroratlar farqi, suyuqlikning turi va fizikaviy xususiyatlari, jarayon kechadigan kenglikning hajmiga bog‘liq bo‘ladi.

Majburiy konveksiya bosimlar farqini hosil qiladigan tashqi ta’sir ta’sirida (masalan, shamol, nasos, kompressor, ventilyator va boshqalar ta’sirida) vujudga keladi. jarayonning intensivligi muhitning turi va fizikaviy xususiyatlari, uning harorati, harakat tezligi, harakat sodir bo‘ladigan kenglikning shakli va o‘lchamlariga bog‘liq bo‘ladi.

Nurlanishi deb energiyaning kenglikda elektromagnitik to‘lqinlar bilan o‘tishi jarayoniga aytiladi.

Nurli issiqlik almashinish deb issiqlikning jismlar o‘rtasida nurlanish bilan uzatilishiga aytiladi, u jismning ichki energiyasining

asta-sekin nurlanish energiyasiga aylanishi, uning kenglikda tarqalishi va nurlanish energiyasining boshqa jismning ichki energiyasiga aylanishini o‘z ichiga oladi.

15.1. Issiqlik o‘tkazuvchanlik

15.1.1. Asosiy tushunchalar

Harorat maydoni. Issiqlik almashinishi jarayoni faqatgina jismning (yoki tizimning) turli nuqtalarida harorat bir xil emas degan shartda o‘rinli bo‘ladi. Umumiy holatda jismlarda issiqlikning tarqalish jarayoni va jismlar o‘rtasida issiqlik almashinishiga kenglikda ham, vaqtda ham haroratning o‘zgarishi hamrohlik qiladi. Berilgan τ vaqt momentida kenglikning *x,u,z* koordinatalar bilan aniqlanadigan barcha nuqtalari uchun t haroratlar qiymatlarining jamlanmasi *harorat maydoni* dleb ataladi

$$t = f(x,y,z,\tau). \qquad (15.1)$$

(15.1) tenglama harorat maydonining yaqqol bo‘lmagan shaklda yozilgan matematik ifodasi bo‘lib hisoblanadi. *Barqaror* (qaror topgan) va *noBarqaror* (qaror topmagan) harorat maydonlari ajratiladi.

Barqaror harorat maydoni harorat kenglikning turli nuqtalarida vaqtda o‘zgarmagan holatda kuzatiladi. Agar harorat vaqtda o‘zgarsa – u holda bunday harorat maydoni nobarqaror harorat maydoni deb ataladi.

Harorat maydoni uchta, ikkita yoki bitta koordinataning funksiyasi bo‘lishi mumkin. SHunga mos ravishda u *uch, ikki va bir o‘lchamli harorat maydoni* deb ataladi.

Eng oddiy bir o‘lchamli barqaror harorat maydonining tenglamasi quyidagi ko‘rinishga ega:

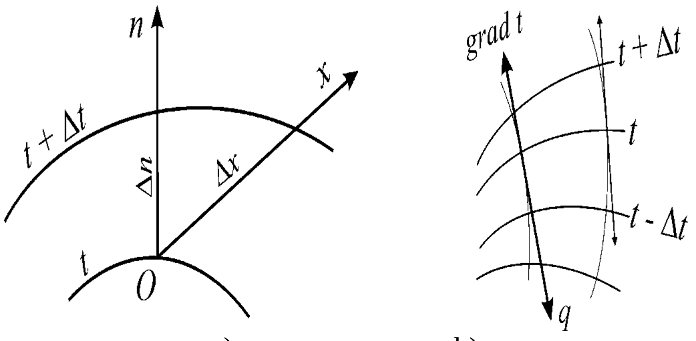
$$t = f(x). \qquad (15.1a)$$

Harorat maydonining tasnifiga muvofiq prinsipial jihatdan Barqaror va noBarqaror issiqlik uzatilish jarayonlari ajratiladi.

Harorat gradienti. Agar jismning bir xil haroratga ega bo‘lgan nuqtalari tutashtirilsa, u holda teng haroratli yuzalarni olamiz, ular *izotermik yuzalar* deb ataladi, ya’ni jismning izotermik yuzasi deb bir xil haroratga ega bo‘lgan geometrik sirtga aytiladi. Jismning xuddi o‘sha bitta nuqtasining o‘zida haroratning ikkita turlicha qiymati bo‘lishi mumkin emasligi sababli, izotermik yuzalar kesishmaydi, ular

yoki jismning o‘zining ichida yopiladi, yoki uning chegaralarida uziladi.

Bir-biriga yaqin joylashgan, t va $t+\Delta t$ haroratlarga ega bo‘lgan ikkita izotermik yuzalarni ko‘rib chiqamiz (1 rasm). t haroratga ega bo‘lgan izotermik yuza bo‘ylab ko‘chishda haroratning o‘zgarishi kuzatilmaydi. x yo‘nalish bo‘yicha haroratning $t+\Delta t$ qiymatiga mos keladigan izotermaga qarab ko‘chishda esa biz haroratning o‘zgarishini kuzatamiz. Bunda haroratning uzunlik birligiga to‘g‘ri keladigan eng katta o‘zgarishi izotermik yuzaga o‘tkazilgan n normal yo‘nalishida kuzatiladi. Izotermik yuzaga o‘tkazilgan normal yo‘nalishida harorat-ning o‘zgarishining intensivligi haroratlar gradienti bilan tavsiflanadi.

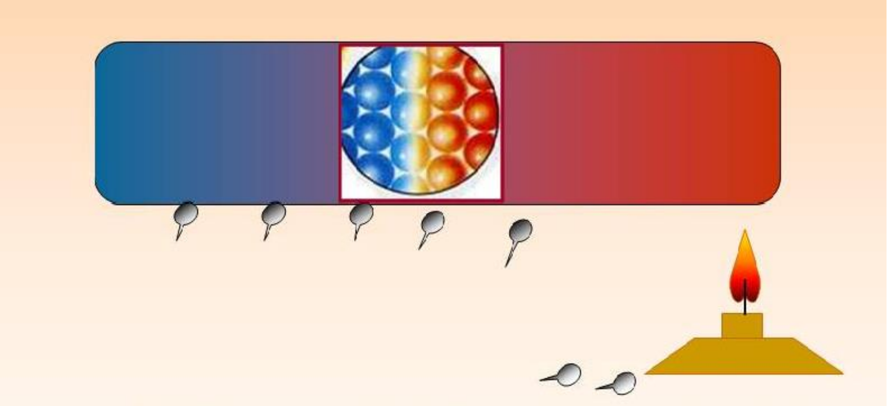


15.1-rasm. Harorat gradienti, izotermik chiziqlar (a) va issiqlik oqimini aniqlash (b)

Harorat gradienti normal bo‘ylab izotermik yuzaga harorat ortib boradigan tomonga qarab yo‘naltirilgan va son jihatidan Δt harorat o‘zgarishining Δn normal bo‘yicha izotermalar o‘rtasidagi masofaga nisbatining chegarasiga teng bo‘lgan vektordir (*K/m*)

$$grad\,t = \lim_{\Delta n \to 0}\left(\frac{\Delta t}{\Delta n}\right) = \frac{\partial t}{\partial n} \qquad (15.2)$$

Issiqlik oqimi. Vaqt birligida G' izotermik yuza orqali o‘tadigan Q issiqlik miqdori *issiqlik oqimi* deb ataladi. YUzaning maydon birligiga to‘g‘ri keladigan issiqlik oqimi solishtirma issiqlik oqimi, issiqlik oqimining zichligi deb ataladi.



15.2-rasm. Issiqlik o‘tkazuvchanlik

Agar yuzaning turli nuqtalari uchun harorat gradienti turlicha bo‘lsa, u holda vaqt birligida butun izotermik yuza orqali o‘tadigan issiqlik miqdori

$$Q = \int_F q \cdot dF \,, \qquad (15.3)$$

ga teng bo‘ladi,

bu yerda *Q* – issiqlik oqimi, *Vm*;

dF – izotermik yuza, *m*.

Q va *q* kattaliklar vektor bo‘lib hisoblanadi, ularning musbat yo‘nalishi sifatida izotermik yuzaga o‘tkazilgan normalning harorat pasayib boradigan tomonga qaragan yo‘nalishi qabul qilinadi (15.1-rasm).

15.2. Barqaror harorat maydonida issiqlik o‘tkazuvchanlik

Issiqlik o‘tkazuvchanlik o‘zida turlicha haroratga ega bo‘lgan jismlarning yoki jismning turlicha haroratga ega bo‘lgan qismlarining bir-biriga bevosita tegishi yo‘li bilan issiqlik uzatilishi jarayonini taqdim qiladi. Bunda issiqlik almashinishi jarayoni bir zarrachalarning mikroharakat energiyasining boshqa zarrachalarga uzatilishi hisobiga sodir bo‘ladi.

Issiqlik o‘tkazuvchanlik sof ko‘rinishda qattiq jismlarda, shuningdek ularda konveksiya va nurlanish bo‘lmaganda qo‘zg‘almas gazlar va suyuqliklarda kuzatiladi.

Metallarda issiqlikning oʻtishi erkin elektronlarning harakati (diffuziya) yoʻli bilan, ikkinchi darajada kristall panjaraning qayishqoq tebranishlari hisobiga issiqlik uzatilishi bilan amalga oshadi. Suyuqliklar va qattiq jismlar – dielektriklarda issiqlik oʻtkazuvchanlik qayishqoq toʻlqinlar bilan amalga oshadi.

Gazsimon jismlarda issiqlikning issiqlik oʻtkazuvchanlik bilan tarqalishi turlicha issiqlik harakat tezligiga ega boʻlgan molekulalar oʻzaro toʻqnashganda energiya almashinishi oqibatida (molekulalar va atomlarning diffuziyalanishi yoʻli bilan) sodir boʻladi.

15.3. Barqaror issiqlik oʻtkazuvchanlik

Issiqlikning tarqalishining zarur sharti koʻrib chiqilayotgan muhitda haroratning notekis taqsimlanishi boʻlishi zarurligi boʻlib hisoblanadi.

Fure qonuniga muvofiq, $d\tau$ vaqt oraligʻida izotermik yuzaning dF elementi orqali oʻtadigan issiqlik miqdori harorat gradientiga proporsional boʻladi:

$$\delta Q = -\lambda \cdot grad\, t \cdot dF \cdot d\tau = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot dF \cdot d\tau, \qquad (15.4)$$

bu yerda λ – proporsionallik koeffitsiyenti, moddaning fizikaviy parametri boʻlib hisoblanadi va issiqlik oʻtkazuvchanlik koeffitsiyenti deb ataladi, *Vt/(m·K)*;

dF – issiqlik almashinish yuzasining elementar maydoni, m^2;

$d\tau$ – vaqt oraligʻi, *sek.*

Vaqt birligida izotermik yuzaning maydon birligi orqali oʻtadigan issiqlik miqdori *issiqlik oqimining zichligi* deb ataladi:

$$q = \frac{\delta Q}{dF \cdot d\tau}. \qquad (15.5)$$

Vaqt birligida G' izotermik yuza orqali oʻtadigan Q issiqlik miqdori *issiqlik oqimi* deb ataladi (*J/s* = *Vt*)

$$Q = \int_F q \cdot dF = -\int_F \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot dF. \qquad (15.6)$$

Q issiqlik oqimi va q issiqlik oqimining zichligi vektorlar boʻlib hisoblanadi, ularning musbat yoʻnalishi sifatida izotermik yuzaga oʻtkazilgan normal boʻyicha harorat pasayib boradigan tomonga qaragan yoʻnalishi qabul qilinadi (1-rasm).

Issiqlik oqimi zichligi vektorining skalyar kattaligi quyidagiga teng:

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n}. \qquad (15.7)$$

Issiqlik oqimi vektorining skalyar kattaligi

$$Q = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot F, \qquad (15.8)$$

ga teng.

(16.7 va 16.8) tenglamalarning o‘ng qismidagi minus belgisi issiqlik oqimi va harorat gradienti vektorlar sifatida qarama-qarshi yo‘nalishga ega ekanligini ko‘rsatadi.

To‘liq issiqlik miqdori

$$Q_\tau = -\int_0^\tau \int_F \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot dF \cdot d\tau, \qquad (15.9)$$

ga teng.

x,y,z o‘qlar yo‘nalishida issiqlik oqimlari zichligining ifodasini quyidagi ko‘rinishda yozish mumkin:

$$q_x = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x}; q_y = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial y}; q_z = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z}. \qquad (15.10)$$

Uch o‘lchamli masala uchun issiqlik oqimining vektori (16.10) ni hisobga olish bilan

$$q = i \cdot q_x + j \cdot q_y + k \cdot q_z, \qquad (15.10a)$$

ni tashkil qiladi.

Bu yerda $i, j, k - x, y, z$ yo‘nalishda birlik vektorlar

15.4. Issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti

Issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti deganda harorat gradientining birlik qiymatida birlik yuza orqali uzatiladigan issiqlik oqimi tushuniladi:

$$\lambda = \frac{\delta Q}{F \cdot |grad\, t|}. \qquad (15.11)$$

Issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti har bir jism uchun o‘zining sonli qiymatiga ega va jismning tabiati, g‘ovakligi, namligi, bosimi, harorati va boshqa parametrlariga bog‘liq bo‘ladi. (7) tenglamani chiqarishda λ haroratga bog‘liq emas va doimiy kattalik bo‘lib hisoblanadi deb qabul qilingan. Biroq tajribalarning ko‘rsatishicha,

ko‘pgina materiallar uchun issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyentining haroratga bog‘lanishini amaliyot uchun etarli bo‘lgan aniqlik bilan butun ko‘rib chiqiladigan haroratlar intervalida chiziqli bog‘lansh deb qabul qilish mumkin:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 \pm b\theta), \tag{15.12}$$

bu yerda λ_0 – t_0 haroratda issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti;

b – materialning harorati *1K* ga oshganda uning issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyentining ortishini (kamayishini) tavsiflaydigan doimiy kattalik.

Eng yomon issiqlik o‘tkazuvchilar gazlar bo‘lib hisoblanadi. Gazlarning issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti harorat ortishi bilan ortadi va 0,005 – 0,5 *Vt/(m·K)* oraliqda o‘zgaradi.

Suyuqliklarning issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti 0,07–0,7 *Vt/(m·K)* oraliqda yotadi va qoidaga ko‘ra, harorat ortishi bilan kamayadi (suv va glitserin bundan mustano).

Eng yaxshi issiqlik o‘tkazuvchilar metallar bo‘lib hisoblanadi. Ularda $\lambda = 10 \div 420$ *Vt/(m·K)*. Ko‘pchilik metallarda harorat ortishi bilan mazkur koeffitsiyent kamayadi.

15.5. YAssi devorning issiqlik o‘tkazuvchanligi

YAssi devor uchun Fure qonunini yozamiz:

$$q=-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \tag{15.13}$$

bu ifodani dt orqali yozamiz

$$dt=-\frac{q}{\lambda}\partial x \tag{15.14}$$

(16.14) ifodani integrallab,

$$t=-\frac{q}{\lambda}x + s \tag{15.15}$$

ifodani olamiz.

c va t larni chegara shartidan aniqlaymiz, x=0 bo‘lganda $s = t_{d1}$ ga, x=δ bo‘lganda $t=t_{d2}$ ga deb, issiqlik oqimi zichligini hisoblash ifodasiga ega bo‘lamiz:

$$q = (\lambda / \delta)\,(t_{d1} - t_{d2}) \qquad Vt/m^2 \tag{15.16}$$

bu erda: $t_{d1} - t_{d2}$ – haroratlar farqi;

λ/δ – devo‘rning issiqlik o‘tkazuvchanligi, Vt/m^2K,

δ/λ – devo‘rning termik qarshiligi.

Issiqlik oqimi quyidagicha aniqlanadi:

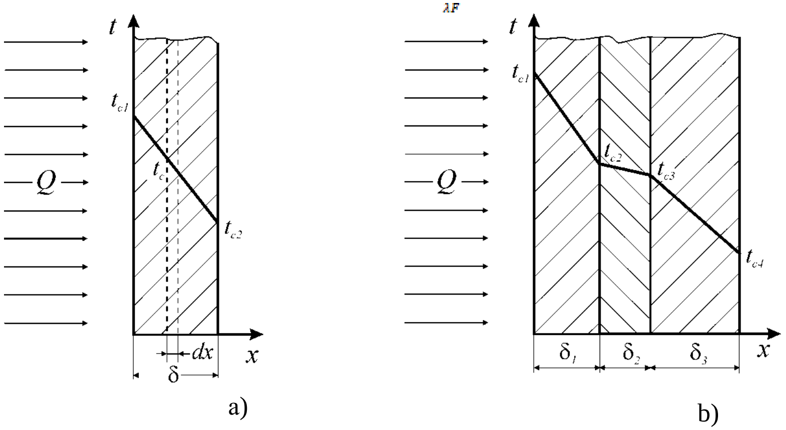
$$Q = qF = \frac{\lambda}{\delta}(t_{жисм1} - t_{жисм2})F \qquad (15.17)$$

$\frac{\lambda}{\delta}$ nisbat yassi devorning issiqlik o‘tkazuvchanligi deb ataladi. $\frac{\delta}{\lambda}$ teskari kattalik o‘zida yassi devorning solishtirma termik qarshiligini taqdim qiladi.

(15.16) va (15.17) tenglamalarni quyidagicha taqdim qilish mumkin:

$$q = \frac{t_{жисм1} - t_{жисм2}}{\frac{\delta}{\lambda}} \qquad (15.18)$$

$$Q = qF = \frac{t_{жисм1} - t_{жисм2}}{\frac{\delta}{\lambda F}} \qquad (15.19)$$



15.3- rasm. Bir qatlamli (a) va uch qatlamli (b) yassi devorning issiqlik o‘tkazuvchanligi

Shunday qilib, solishtirma yoki to‘liq issiqlik oqimining kattaligi devorning termik qarshiligiga bog‘liq bo‘ladi.

Quyidagi shartlarda *uch qatlamli yassi devor* orqali issiqlik o‘tkazuvchanlik bilan issiqlik uzatilishini ko‘rib chiqamiz (15.3,b-rasm): devor qatlamlarining qalinligi δ_1, δ_2, δ_3; materiallarning issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyentlari mos ravishda λ_1, λ_2, λ_3; devorlar o‘rtasidagi kontakt ideal va qo‘shni qavatlarning chegarasida harorat bir xil. Issiqlikning o‘tishi Barqaror sharoitlarda sodir bo‘ladi – issiqlik oqimining zichligi devorning barcha qatlamlari bo‘ylab bir xil qiymatga ega (q=*const.*). Bu sharoitlarda

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1}(t_{жисм1} - t_{жисм2}) = \frac{\lambda_2}{2}(t_{жисм3} - t_{жисм2}) = \frac{\lambda_3}{\delta_3}(t_{жисм3} - t_{жисм4}) \qquad (15.20)$$

Bu tengliklar qatoridan haroratlar farqini (devorning qatlamlari bo‘yicha haroratning pasayishini) ajratamiz:

$$t_{жисм1} - t_{жисм2} = q\frac{\lambda_1}{\delta_1} = qR_1 \qquad (15.21)$$

$$t_{жисм2} - t_{жисм3} = q\frac{\lambda_2}{\delta_2} = qR_2 \qquad (15.21a)$$

$$t_{жисм3} - t_{жисм4} = q\frac{\lambda_3}{\delta_3} = qR_2 \qquad (15.21b)$$

Haroratlar farqi tenglamalarining chap va o‘ng qismlarini qo‘shish bilan chapda devorda $t_{жисм1} - t_{жисм4}$ harorat o‘zgarishini, o‘ngda – q issiqlik oqimining zichligi va $R_1 + R_2 + R_3 = R$ uch qatlamli yassi devorning termik qarshiligi ko‘paytmasini olamiz:

$$t_{жисм1} - t_{жисм4} = q\left\{\frac{\lambda_1}{\delta_1} + \frac{\lambda_2}{\delta_2} + \frac{\lambda_3}{\delta_4}\right\} = q(R_1 + R_2 + R_3) \qquad (15.22)$$

Shunday qilib, uch qatlamli yassi devor orqali issiqlik o‘tkazuvchanlik bilan issiqlik o‘tishida issiqlik oqimining zichligi uchun quyidagi ifodani olamiz:

$$q = \frac{t_{жисм1} - t_{жисм4}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{t_{жисм1} - t_{жисм4}}{R_1 + R_2 + R_3}, \qquad (15.23)$$

umumiy holda n – qavatdan tashkil topgan ko‘p qavatli yassi devor uchun bu ifoda quyidagicha yoziladi:

$$q = \frac{t_{жисм1} - t_{жисм(n+1)}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}} = \frac{t_{жисм1} - t_{жисм(n+1)}}{\sum_{i=1}^{n} R_i} = \frac{t_{жисм1} - t_{жисм(n+1)}}{R}, \qquad (15.24)$$

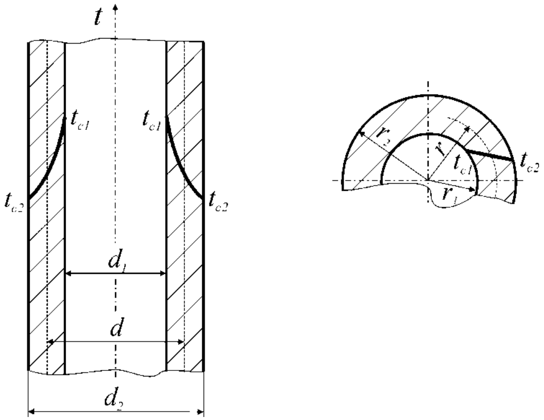
bu yerda R – ko‘p qtlamlili yassi devorning umumiy termik qarshiligi.

(15.24) nisbatdan kelib chiqishicha, issiqlik oqimining zichligi $t_{жисм1} - t_{жисм(n+1)}$ haroratlar farqiga to‘g‘ri proporsional va R devorning termik qarshiligiga teskari proporsional bo‘ladi.

15.6. Silindrik devorning issiqlik o‘tkazuvchanligi

Yassi devor holatida q issiqlik oqimining zichligi barcha izotermik yuzalar uchun bir xil bo‘ladi.

Silindrik devor holatida har qanday izotermik yuza orqali o‘tgan issiqlik oqimining zichligi o‘zgaruvchan kattalik bo‘ladi, chunki yuzaning maydonining kattaligi radiusga bog‘liq bo‘ladi.



15.4-rasm. Silindrik devorning issiqlik o‘tkazuvchanligi

Silindrik devor orqali o‘tadigan issiqlik oqimini aniqlash uchun Fure qonunidan foydalanamiz:

$$Q = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \cdot F\,. \qquad (15.25)$$

Fure tenglamasiga (15.4) harorat gradientining qiymatini o‘rniga qo‘yish bilan ($F = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$ ekanligini hisobga olish bilan) silindrik devor orqali o‘tadigan issiqlik oqimi uchun ifodani olamiz:

$$Q = \frac{2\pi\lambda l (t_{жисм1} - t_{жисм2})}{ln\frac{r_2}{r_1}} \qquad (15.26)$$

yoki

$$Q = \frac{2\pi\lambda l (t_{жисм1} - t_{жисм2})}{ln\frac{d_2}{d_1}} = \frac{\pi l (t_{жисм1} - t_{жисм2})}{\frac{1}{2\lambda} ln\frac{d_2}{d_1}} \qquad (15.26a)$$

Issiqlik oqimi yoki ichki yoki tashqi yuzaning birligiga, yoki uzunlik birligiga nisbatlanishi mumkin.

Ichki yuzaning maydon birligi orqali o‘tadigan issiqlik oqimi (q_1)

$$q_1 = \frac{Q}{\pi d_1 l} = \frac{(t_{жисм1} - t_{жисм2})}{d_1 \frac{1}{2\lambda} ln\frac{d_2}{d_1}} \qquad (15.27)$$

Tashqi yuzaning maydon birligi orqali o‘tadigan issiqlik oqimi (q_2)

$$q_1 = \frac{Q}{\pi d_2 l} = \frac{(t_{жисм1} - t_{жисм2})}{d_2 \frac{1}{2\lambda} ln\frac{d_2}{d_1}} \qquad (15.28)$$

Silindrik devorning uzunlik birligi orqali o‘tadigan issiqlik oqimi (q_l)

$$q_1 = \frac{Q}{l} = \frac{\pi(t_{жисм1} - t_{жисм2})}{\frac{1}{2\lambda} ln \frac{d_2}{d_1}} \qquad (15.29)$$

Uzunlik birligiga nisbatlangan issiqlik oqimi (q_l) *Vm/m* o‘lchamlilikka ega bo‘ladi va chiziqli issiqlik oqimi deb ataladi.

Xuddi ko‘p qatlamli yassi devor uchun issiqlik oqimining hisobiy nisbatini olishdagi kabi mulohaza yuritish bilan ko‘p qatlamli silindrik devor holatida chiziqli issiqlik oqimini aniqlash uchun ifodani olish mumkin.

$$q_1 = \frac{\pi(t_{жисм1} - t_{жисм(n+1)})}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} ln \frac{d_{i+1}}{d_1}} \qquad (15.30)$$

bu yerda $\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \cdot ln \frac{d_{i+1}}{d_i}$ maxraj ko‘p qatlamli silindrik devorning issiqlikni o‘zkazuvchanlikka chiziqli termik qarshiligi deb ataladi.

(15.30) tenglamadan har qanday ikkita qatlamning chegarasidagi haroratni aniqlash mumkin

$$t_{жисм(i+1)} = t_{жисм1} - \frac{q_1}{2\pi} \left\{ \sum_{i=1}^{i} \frac{1}{2\lambda_i} ln \frac{d_{i+1}}{di} \right\} \qquad (15.31)$$

Masalalar

86. Qozon o‘txonasining qalinligi δ=50 mm bo‘lgan yassi devor orqali gazdan qaynayotgan suvga issiqlik oqimining zichligi q=70 Vt/m^2 o‘tadi. Issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti λ=0,7 Vt/m^{0}C ga teng. Devor sirtlaridagi haroratlar farqini toping

87. Qalinligi δ =390 mm bo‘lgan g‘ishtli devorning ichki sirtidagi harorati 300^{0}C va tashqi sirtidagi harorati 60^{0}C va devor orqali issiqlikning yo‘qolishi q=178 Vt/m^2 bo‘lganda, issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyentini toping.

88. Jismning issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti λ=19,20 Vt/m ^{0}C va devor qalinligi δ =400 mm. Haroratlari 110 ^{o}C va 30 ^{o}C. YUzadan o‘tayotgan issiqlik oqimi 3950 Vt bo‘lganda quvur yuzasini toping.

89. Qalinligi δ =60 mm, uzunligi 1,5 m va balandligi 6 m, haroratlari t_{d1}=80 ^{0}C, t_{d2}=50 ^{0}C bo‘lgan quvurdan Q=300 Vt issiqlik oqib o‘tadi. Izolyasion materialning issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyentini toping.

90. Diametri d_1/d_2=40/50 mm, haroratlari t_{d1}=200 ^{0}C, t_{d2}=100 ^{0}C va issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti λ=50 Vt/mK ga teng bo‘lganda quvurning issiqlik oqimi zichligini toping.

91. Diametrlari d_1/d_2=34/60 mm, uzunligi 1,5 m va issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti λ=0,7 Vt/mK ga teng bo‘lgan quvurdan Q=300 Vt issiqlik oqib o‘tadi. Xaroratlar farqini toping.

92. Ichki diametri 140 mm, qalinligi δ_1 =5 mm, ikki qatlam δ_2 =20 mm va δ_3 =40 mm bilan izolyasiyalangan 1 m bug‘ quvuridan o‘tgan issiqlik oqimi topilsin. Quvurning va izolyasiya qatlamlarining issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyentlari mos ravishda λ_1 =55 Vt/mK, λ_2 =0,037 Vt/mK, λ_3 =0,14 Vt/mK ga teng. Quvurning ichki yuzasi harorati t_{d1}=300 ^{0}C, tashqi izolyasiya qatlami haroorati t_{d4}=55 ^{0}C.

93. Suv ustidagi muzning qalinligi 250 mm, ichki va tashqi haroratlar t_{d1}=0 ^{0}C va t_{d2}=-15 ^{0}C. Agar muzning issiqlik o‘tkazuv-chanlik koeffitsiyenti λ_m =2,25 Vt/mK bo‘lsa, 1 m^2 muz yuzasidan o‘tgan issiqlik oqimi zichligini aniqlang. Muz ustini issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti λ_q =0,465 Vt/mK bo‘lgan 155 mm qor qatlami qoplasa, issiqlik oqimi qanday o‘zgaradi? Qor qatlami ustidagi harorat t_{d2}=-20 ^{0}C.

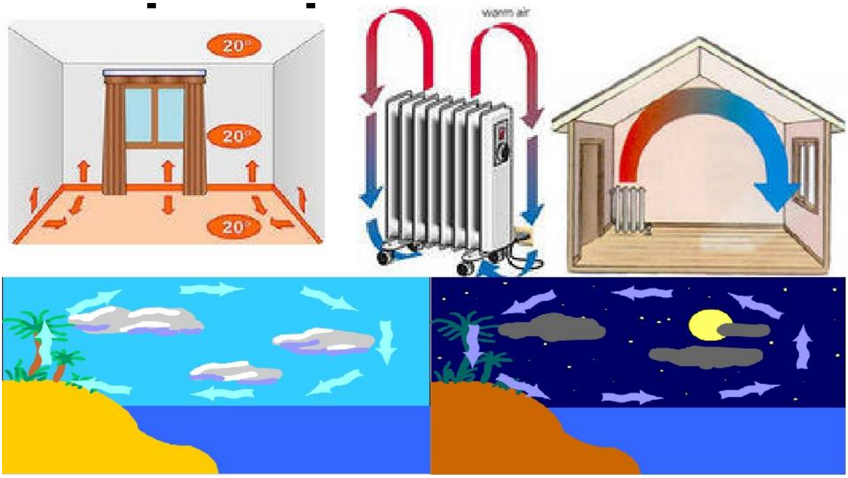
Nazorat savollari

1. Issiqlik necha xil yo‘l bilan tarqaladi?
2. Issiqlik o‘tkazuvchanlik deb nimaga aytiladi?
3. Xarorat maydoni va harorat gradientini tushuntirib bering.
4. Issiqlik o‘tkazuvchanlik qaysi qonunga bo‘ysunadi?
5. YAssi devor issiqlik o‘tkazuvchanligi nimaga teng?
6. Silindrik devor issiqlik o‘tkazuvchanligi qanday aniqlanadi?

16. Konvektiv issiqlik almashinishining asosiy qoidalari

Konvektiv issiqlik almashinuvi deganda suyuqlik yoki gazlarning ikkita jarayon – konveksiya va issiqlik o‘tkazuvchanlik ta’sirida harakatida issiqlik uzatilish jarayoni tushuniladi.

Konveksiya deb suyuqlikning makrozarrachalarining kenglikda ko‘chishiga aytiladi. Agar bu suyuqlik zarrachalari bir haroratga ega bo‘lgan sohadan boshqa bir haroratga ega bo‘lgan sohaga ko‘chsa, ularning ko‘chishiga issiqlik olib o‘tilishi hamrohlik qiladi. Konveksiya bilan issiqlik olib o‘tilishi turlicha qizigan suyuqlik zarrachalarining bir-biriga bevosita tegishida issiqlik o‘tkazuvchanlik bilan birgalikda kuzatiladi.



16.1-rasm. Konveksiya hodisasi

Vaqt birligida suyuqlik tomonidan qattiq devorga beriladigan yoki suyuqlik devordan qabul qilib oladigan issiqlik miqdori Nyuton-Rixman tenglamasi bilan aniqlanadi:

$$Q = \alpha\left(t_{жисм} - t_{суюқлик}\right)F\ , \qquad (16.1)$$

issiqlik oqimining zichligi esa quyidagicha aniqlanadi:

$$q = \alpha\left(t_{жисм} - t_{суюқлик}\right) = \alpha\Delta t\ , \qquad (16.2)$$

bu yerda α – suyuqlik va qattiq jismning yuzasi o‘rtasida konvektiv issiqlik almashinishining jadalligini (intensivligini) tavsiflaydigan

koeffitsiyent, *issiqlik berish koeffitsiyenti* deb ataladi, *Vt/(m^2·K)*; $\Delta t = t_{жисм} - t_{суюқлик}$ – haroratning oqim kuchi (haroratlar farqi), *K*.

(97) ifodaga muvofiq, issiqlik berish koeffitsiyenti jismning yuzasidagi jism yuzasi va atrof-muhitning haroratlar farqiga nisbatlangan issiqlik oqimining zichligi (*q)* bo‘lib hisoblanadi. Issiqlik berish koeffitsiyenti α- son jihatdan 1 sekund vaqt ichida 1 m^2 yuzadan muhitga yoki muhitdan 1 m^2 yuzaga haroratlar farqi ($t_d - t_m$) yoki ($t_m - t_d$) 1^0 C ga teng bo‘lganda berilgan issiqlik miqdoriga teng, agar $t_d > t_m$ bo‘lsa, $\Delta t = t_d - t_m$; agar $t_m > t_d$ bo‘lsa, $\Delta t = t_m - t_d$ bo‘ladi.

Issiqlik berish koeffitsiyenti ko‘pgina omillarga bog‘liq bo‘ladi. Ko‘proq umumiy holatda jismning shakli va o‘lchamlari, suyuqlikning harakat rejimi, suyuqlikning fizikaviy xossalari, issiqlik almashinish yuzasining kenglikda joylashuvi va holati va boshqa kattaliklarning funksiyasi bo‘lib hisoblanadi. Issiqlik berish jarayoni suyuqlik harakatining tabiatiga bog‘liq ravishda turlicha kechadi.

Issiqlik tashuvchining harakati erkin yoki majburiy bo‘lishii mumkin. Birinchi holatda suyuqlik yoki gaz berilgan jarayon uchun tashqi bo‘lgan kuchlar hisobiga (nasos, ventilyator, shamol), ikkinchi holatda – suyuqlikning qizigan va sovuq zarrachalarining zichliklar farqi hisobiga harakatlanadi. Erkin yoki tabiiy harakatning vujudga kelishi va intensivligi (jadalligi) jarayonning issiqlik sharoitlari bilan belgilanadi va suyuqlikning turi, haroratlar farqi va jarayon unda kechadigan kenglikning hajmiga bog‘liq bo‘ladi.

Suyuqlikda (gazda) erkin harakat zichliklar farqi hisobiga sodir bo‘lishi mumkin, faqatgina suyuqlik erning tortish maydonida bo‘lganda paydo bo‘lishi mumkin.

Majburiy harakatga umumiy holatda erkin harakat hamrohlik qilishi mumkin. Majburiy harakatning tezligi katta bo‘lganda erkin konveksiyaning ta’siri hisobga olmasa bo‘ladigan darajada kichik bo‘ladi.

16.1. O‘xshashlik nazariyasi va o‘lchamlilikni tahlil qilish uslubining asoslari

Konvektiv issiqlik almashinishining differensial tenglamalarini echish uchun analitik yo‘l bilan echishning imkoniyatlari cheklan-ganligi sababli, bunday tenglamalarni echishda eksperimental tadqiq qilish hal qiluvchi ahamiyat kasb etadi.

Eksperimental tadqiq qilishning maqsadi eksperimental ma’lumotlar asosida ular bo‘yicha keyinchalik bunday jarayonlarda issiqlik almashinishini hisoblash mumkin bo‘ladigan tenglamalarni olish bo‘lib hisoblanadi.

Buning uchun ular bajarilganda jarayonlar o‘xshash bo‘ladigan asosiy shartlarni ifodalash zarur bo‘ladi.

Bu shartlar o‘xshashlik nazariyasi doirasida ifrdalanadi. O‘xshashlik tushunchasi geometriyadan “berib tur” ga olingan, bu yerda geometrik figuralarning o‘xshashlik shartlari ko‘rib chiqiladi. Geometrik figuralar o‘xshash bo‘lishi uchun odatdagi o‘xshashlik alomatlarining (tutashuvchi tomonlarning o‘xshashligi, burchaklarning tengligi va boshqalar) bo‘lishi etarli bo‘ladi. Fizikaviy jarayonlarning o‘xshash bo‘lishi uchun fizikaviy kattaliklar va hodisalarning o‘xshashligi to‘g‘risida gapirish zarur bo‘ladi. Agar hodisalarni tavsiflaydigan barcha fizikaviy kattaliklar o‘xshash bo‘lsa, ikkita yoki bir nechta hodisalar o‘xshash bo‘ladi, ya’ni *o‘zaro o‘xshash bo‘lgan hodisalar bir xil o‘lchamsiz majmualarga – o‘xshashlik mezonlariga ega bo‘ladi.* Bu xulosa shundan guvohlik beradiki, tajribalarda berilgan jarayonni tavsiflaydigan o‘xshashlik mezonlariga kiradigan kattaliklarni o‘lchash kerak bo‘ladi.

O‘xshashlik nazariyasining muhim teoremasi *berilgan jarayonni tavsiflaydigan differensial tenglamaning echimini bu jarayonni tavsiflaydigan o‘xshashlik mezonlari va boshlang‘ich tenglamadan olingan mezonlar o‘rtasidagi funksional bog‘lanish sifatida taqdim qilish mumkin* deya tasdiqlash bo‘lib hisoblanadi. Bunday tasdiqlash tajriba ma’lumotlariga o‘xshashlik mezonlari o‘rtasidagi bog‘lanishlar ko‘rinishida ishlov berish zarurligini anglatadi.

SHunday qilib, o‘xshashlik nazariyasi, ko‘rib chiqilayotgan jarayonni tasvirlaydigan differensial tenglamalar bor bo‘lganda, tenglamalarning o‘zini echmasdan turib o‘xshashlik sonlari (mezonlari) ifodalarini olish va ular asosida hisobiy bog‘lanishlarni – o‘xshashlik tenglamalarini olish imkonini beradi.

O‘rganiladigan jarayonni tasvirlaydigan differensial tenglamalar bo‘lmagan taqdirda o‘lchamliliklarni tahlil qilish uslubidan foydalaniladi. Biroq bu holda ko‘rib chiqilayotgan jarayonning rivojlanishiga sezilarli ta’sir ko‘rsatuvchi asosiy kattaliklarning ro‘yxati ma’lum bo‘lishi lozim bo‘ladi.

Masalan, erkin konveksiya uchun bunday kattaliklarning ro‘yxati quyidagi boshlang‘ich bog‘lanish bilan aniqlanadi:

$$\alpha = f\left(l, g, \beta, \Delta t, \rho, \eta, \lambda, c_p\right), \tag{16.3}$$

bu yerda l – berilgan jarayon uchun xarakterli bo‘lgan chiziqli o‘lcham, m;

β – hajmiy kengayish koeffitsiyenti;

ρ – suyuqlikning zichligi;

η – dinamik qovushqoqlik koeffitsiyenti;

λ – suyuqlikning issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti*;*

Δt – devor va suyuqlikning haroratlarining farqi, *°C*;

c_p – suyuqlikning solishtirma issiqlik sig‘imi, *J/(kg·K)*.

Bu bog‘lanishni bevosita eksperimental tadqiq qilishni ko‘p sonli tajribalar o‘tkazish zarurligi tufayli amalga oshirib bo‘lmaydi.

Bu holda *o‘lchamliliklarni tahlil qilish* ettita mustaqil o‘zgaruvchilardan tashkil topgan berilgan ifodani ikkita umumlashtirilgan o‘lchamsiz o‘zgaruvchilardan tashkil topgan bog‘lanishga (o‘xshashlik tenglamalariga) keltirish imkonini beradi.

16.2. O‘xshashlik mezonlari va mezonli tenglamalar

O‘lchamsiz shaklda taqdim qilingan differensial tenglamalarga kiruvchi kattaliklarning o‘lchamsiz majmuasini ko‘rib chiqamiz:

$$\frac{\alpha \cdot l}{\lambda};\ \frac{w \cdot l}{\nu};\ \frac{w \cdot l}{a};\ \frac{\nu}{a};\ \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2}, \tag{16.4}$$

Bu yerda $\nu = \dfrac{\eta}{\rho}$ – kinematik qovushqoqlik koeffitsiyenti.

O‘lchamli kattaliklardan tuzilgan o‘lchamsiz majmualar o‘xshashlik mezonlari deb ataladi.

Nusselt mezoni konvektiv issiqlik almashinuvi va issiqlik o‘tkazuvchanlik hisobiga uzatiladigan issiqlik oqimlarining nisbatini tavsiflaydi va aniqlanadigan kattalik bo‘lib hisoblanadi

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}. \tag{16.5}$$

Reyndols mezoni inersiya kuchlari va molekulyar ishqalanish (qovushqoqlik) o‘rtasidagi nisbatni tavsiflaydi

$$\mathrm{Re} = \frac{w \cdot l}{\nu}, \qquad (16.6)$$

bu yerda *w* – suyuqlikning o‘rtacha chiziqli tezligi (*m/s*).

Prandtl mezoni jismning fizikaviy xususiyatlarini va ularning konvektiv issiqlik almashinishiga ta’sirini tavsiflaydi

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}, \qquad (16.7)$$

Pekle mezoni konveksiya bilan uzatiladigan issiqlik oqimining zichligining issiqlik o‘tkazuvchanlik bilan uzatiladigan issiqlik oqimining zichligiga nisbatini tavsiflaydi

$$Pe = \frac{w \cdot l}{a} = Re \cdot Pr \qquad (16.8)$$

Grasgof mezoni notekis qizigan suyuqlik hajmlarining zichliklar farqi oqibatida vujudga keladigan ko‘tarish kuchi va molekulyar ishqalanish kuchining nisbatini tavsiflaydi va suyuqlikning erkin harakatining intensivlik parametri bo‘lib hisoblanadi

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2}. \qquad (16.9)$$

Suyuqliklarning issiqlik-fizikaviy xususiyatlarining o‘xshashlik sonlariga kiradigan tavsiflari umumiy holatda haroratga bog‘liq bo‘ladi. SHu sababli o‘xshashlik mezonlarining sonli qiymatlarini aniqlash uchun suyuqlikning issiqlik-fizikaviy tavsiflari tanlanadigan harorat ko‘rsatiladi.

Masalalar

94. Diametri d=20 mm va uzunligi *l*=2,3 m bo‘lgan quvurdan o‘rtacha harorati t_s = 150°C ga teng suv haydaladi. Devor harorati t_d = 170 ^{o}C va olib ketiladigan issiqlik miqdori 9 kVt bo‘lishi uchun suv qanday tezlikda haydalishi kerak?

t_s = 150 ^{o}C da tutun gazlari uchun $\lambda=0{,}685\frac{\text{Vt}}{\text{m}\ K}$, $\nu=0{,}202\cdot10^{-6}$ m^2/s; Pr_s =1,17, Pr_d =1,5.

Javob. ω = 0,36 *m/sek* t_s= 20°C

95. Diametri d = 16 *mm* gorizontal quvurdan suv oqadi. Suvning sarfi G = 20 kG/soat, quvurga kirishdagi harorat t_{s1} = 90°C. Quvur devorining o‘rtacha harorati t_d=16°C. CHiqishdagi harorat t_{s2} = 30°C bo‘lishi uchun quvurning uzunligi nechaga teng bo‘lishi kerak.

Suvning o‘rtacha harorati t_{cp}=60°C da: ν=0,478 10^{-6} m^2/s; λ=0,567 Vt/m grad; ρ= 983 kg/m^3; Pr_s=2,98; Pr_d=8 ; c_s =0,998 J/kg grad.

96. YUpqa plastina uzunligi ℓ_0=2 m va eni a=1,5 m havoning ko‘ndalang oqimi bilan yuviladi. Oqim tezligi va harorati mos ravishda ω=3 m/sek i t_0=20 ^oS. Plastina yuzasi harorati t_d=90 ^oS. Plastina uzunligi bo‘yicha issiqlik berish koeffitsenti va plastinani havoga bergan issiqlik oqimini toping. t_0=20 ^oC da ν=15,06 $\cdot 10^{-6}$ m^2/sek; λ=0,0259 Vt/(m·K); Pr=0,703. Laminar oqim.

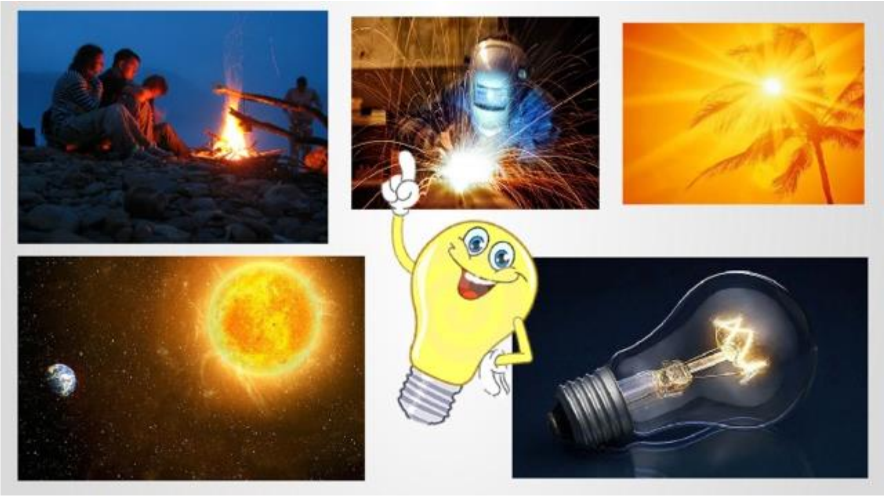
97. Erkin konveksiyada issiqlik almashuv apparatining balandligi bo‘yicha yo‘qolayotgan issiqlik oqimini toping. Uzunligi 10 m, diametri 3,5 m, yuza harorati 55 ^oC va havoning harorati 25 ^oC. $t_{o‘rt}$= 40 ^oC da: λ=0,0275 Vt/(m·K); ν=16,9·10^{-6} m^2/s; Pr=0,7; $\beta = \frac{1}{273 + t_{cp}}$ K^{-1}.

Nazorat savollari

1. Konveksiya hodisasini tushuntirib bering.
2. Erkin va majburiy konveksiya farqini tushuntirib bering.
3. Konveksiya qaysi qonunga bo‘ysunadi?
4. Issiqlik berish koeffitsiyenti qaysi faktorlarga bog‘liq?
5. Mezon nima? Nusselt, Reynolds, Prandtl va Grasgof mezonlari nimani ifodalaydi?
6. Erkin konveksiya qaysi mezonlarga bog‘liq bo‘ladi?
7. Majburiy konveksiya qaysi mezonlarga bog‘liq bo‘ladi?

17. Nurlanish usulida issiqlik uzatilishi

Nurlanish deb kenglikda jismlar o‘rtasida ichki energiyaning tarqalishiga aytiladi. Bunda ichki energiyaning ikki marta aylanishi sodir bo‘ladi: jismning ichki energiyasi nur energiyasiga aylanadi va elektromagnitik to‘lqinlar yordamida kenglikda uzatiladi (nurlanish bilan), o‘z navbatida, elektromagnitik to‘lqinlar energiyasi oqimi (nur energiyasi) boshqa jism tomonidan yutilganda ichki energiyaga aylanadi.



17.1-rasm. Nurlanishga misollar

Elektromagnitik to‘lqinlarni qo‘zg‘atuvchilar zaryadlangan ionlar va elektronlar hisoblanadi. Ionlarning tebranishi past chastotali nurlanishga mos keladi. Elektronlarning tebranishlari bilan chaqiriladigan nurlanish, agar elektronlar atomlar va molekulalar tarkibiga kirsa, yuqori chastotaga ega bo‘lishi mumkin. Erkin elektronlarga ega bo‘lgan moddalarning nurlanishi turli chastotali, jumladan past chastotali to‘lqinlarga ega bo‘lgan impulsli xarakterga ega bo‘ladi.

Elektromagnitik nurlanishning barcha turlari bir xil tabiatga ega va faqatgina to‘lqin uzunligi bilan farq qiladi.

Qattiq va suyuq jismlarning katta qismi yaxlit nurlanish spektriga ega, ya’ni energiyani to‘lqin uzunliklarining butun diapazonida

nurlatadi. Ba'zi bir jismlar (toza metallar, gazlar va boshqalar) energiyani faqatgina to'lqin uzunliklarining ma'lum bir intervallarida nurlantiradi. Bunday nurlanish tanlanma yoki selektiv nurlanish deb ataladi.

Jismning harorati ortishi bilan, gazlarda esa – qatlamning qalinligi va gazning bosimi ortishi bilan nurlanayotgan energiya miqdori ortadi.

Nurlanishning ba'zi bir turlari jismlar tomonidan yutilganda qizishni chaqirish bilan issiqlik energiyasiga aylanish xususiyatiga ega. Nurlanishning bu xususiyati to'lqin uzunligi bilan belgilanadi va jismning haroratiga bog'liq bo'ladi. Bunday xususiyatlarga eng katta darajada 0,8 dan 800 mk gacha to'lqin uzunligiga ega bo'lgan ko'rinadigan infraqizil nurlanish (issiqlik nurlanishi) ega.

Vaqt birligida jismning yuzasi tomonidan butun to'lqin uzunliklari intervalida *(* $\lambda = 0$ dan $\lambda = \infty$ kacha) nurlatiladigan energiya miqdori *Q to'liq (integral) nur oqimi* deb ataladi (*Vt*). To'lqin uzunliklarining tor intervaliga mos keluvchi nurlanish *monoxromatik nurlanish* deb ataladi. Nurlatuvchi jismning yuza birligidan yarim kenglikning barcha yo'nalishlariga chiqadigan nur oqimi *E integral nurlanishning zichligi* deb ataladi (Vt/m^2)

$$E = \frac{dQ}{dF} \qquad (17.1)$$

(17.1) tenglamadan nurlatuvchi jismning butun yuzasidan chiqadigan nur oqimi

$$Q = \int_F E \cdot dF \qquad (17.2)$$

ga teng bo'lishi kelib chiqadi.

Integral nurlanishning to'lqin uzunliklarining ko'rib chiqilayotgan diapazoniga nisbatlangan zichligi E_λ *nurlanishning spektral intensivligi* deb ataladi (Vt/m^3)

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} \qquad (17.3)$$

Jismga tushayotgan nur oqimi (*Q*) jism tomonidan qisman yutiladi (Q_A), qisman qaytariladi (Q_R), qisman jism orqali o'tib ketadi (Q_D) (16 rasm).

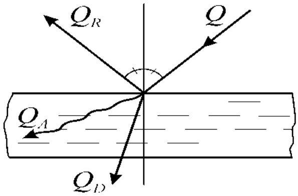
$$Q = Q_A + Q_R + Q_D. \qquad (17.4)$$

Tenglikning har ikkala qismini *Q* ga bo'lish va $Q_A/Q=A;\ Q_R/Q=R$ deb belgilash bilan

$$1 = A+R+D. \quad (17.5)$$

ni olamiz.

A, R, D koeffitsiyentlar mos ravishda jismning yutish, qaytarish va o‘tkazish (shaffoflik) xususiyatlarini tavsiflaydi. SHu bois ular yutish, qaytarish va o‘tkazish koeffitsiyentlari deb ataladi. Bu koeffitsiyentlar turli jismlar uchun 0 dan 1 gacha o‘zgarishi mumkin.



17.2- rasm. Jismga tushayotgan nur oqimining taqsimlanishi

Ularga tushadigan hamma nurli energiyani yutadigan jismlar, $Q_A = Q$ va $A = 1$ $(R = D = 0)$, *absolyut qora jismlar* deb ataladi. Unga tushadigan hamma nurli energiyani qaytaradigan jism, $Q_R = Q$; $R = 1$ $(A = D = O)$, *absolyut oq* yoki *oyna jism* deb ataladi. Unga tushadigan hamma nurli energiyani o‘tkazib yuboradigan jism, $Q_D = Q$; $D = 1$ $(A = R = O)$, *absolyut shaffor jism* deb ataladi. Tabiatda absolyut qora, oq va shaffof jismlar mavjud emas.

17.1. Nurlanish qonunlari

Plank qonuni absolyut qora jismning spektral nurlanish intensivligi va jismning absolyut harorati o‘rtasidagi bog‘lanishni aniqlaydi.

Plankning aniqlashicha, absolyut qora jism uchun nurlanish intensivligining to‘lqin uzunliklari bo‘yicha o‘zgarishi quyidagi qonunga bo‘ysunadi:

$$E_{0\lambda} = c_1 \lambda^{-5}\left(e^{c_2/(\lambda T)} - 1\right)^{-1}, \quad (17.6)$$

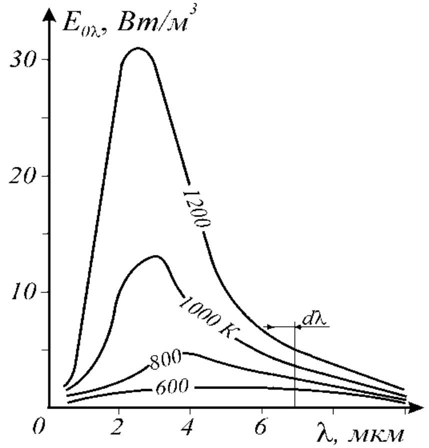
bu yerda $E_{0\lambda}$ – absolyut qora jismning nurlanish intensivligi, Vt/m^3;
$c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$ $Vt \cdot m^2$ – birinchi Plank doimiysi;

λ - to‘lqin uzunligi, *m*;

$c_2 = 0,0144 m \cdot K$ – ikkinchi Plank doimiysi.

17.3-rasmda keltirilgan izotermalardan ko‘rinib turibdiki, nurlanish intensivligi qisqa to‘lqinlar uchastkasida tezda maksimumgacha ortadi, so‘ngra esa asta-sekin kamayadi. Xuddi o‘sha bitta to‘lqin uzunligida,

jismning harorati qanchalik yuqori bo‘lsa, nurlanish intensivligi shunchalik katta bo‘ladi. Jismning haroratining har bir qiymatiga to‘lqin uzunligining maksimal energiya miqdori nurlatiladigan ma’lum bir qiymati mos keladi



17.3-rasm. Absolyut qora jismning spektral nurlatish intensivligi

Vin qonuni harorat va unga maksimal nurlanish intensivligi to‘g‘ri keladigan to‘lqin uzunligi o‘rtasidagi bog‘lanishni aniqlaydi. Nurlanish intensivligining maksimumi jismning harorati ortishi bilan qisqa to‘lqinlar tomonga qarab siljiydi

$$\lambda_m = 2{,}898/\left(T \cdot 10^3\right), \text{ mm} \qquad (17.7)$$

Stefan – Bolsman qonuni absolyut qora jismning yarimsferik integral nurlanish zichligi va jismning absolyut harorati o‘rtasidagi bog‘lanishni aniqlaydi. Absolyut qora jismning nurlanish zichligi to‘rtinchi darajali absolyut haroratga to‘g‘ri proporsional bo‘ladi

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4 = c_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \qquad (17.8)$$

bu yerda σ_0, c_0 – proporsionallik koeffitsiyentlari (nurlanish doimiylari);

$\sigma_0 = 5{,}76 \cdot 10^{-8}$ Vt/(m^2 ·K^4); c_0 = 5,76 Vt/(m^2 ·K^4).

Kulrang jismlar uchun Stefan-Bolsman qonuni quyidagi ko‘rinishda yoziladi

$$E = c \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 , \qquad (17.9)$$

bu yerda *s*– kulrang jismning nurlanish koeffitsiyenti.

Konkret jismlar uchun c ning sonli qiymatlari tajribalar yo‘li bilan aniqlanadi.

Bir xil haroratda kulrang va absolyut qora jismning nurlanish zichliklarini taqqoslash *ε* qoralik darajasi deb ataluvchi tavsifga olib keladi

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{c}{c_0} , \qquad (17.10)$$

bu yerda ε – jismning qoralik darajasi yoki jismlarning nisbiy nurlanish qobiliyati, u noldan (absolyut oq jism) birgacha (absolyut qora jism) o‘zgaradi.

Kirxgof qonuni integral yarimsferik nurlanishning zichligi va jismlarning yutish qobiliyati o‘rtasidagi bog‘lanishni aniqlaydi

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \cdots = \frac{E_n}{A_n} = E_0 = f(T), \qquad (17.11)$$

ya’ni yarim sferik integral nurlanish zichligining jismning yutish qobiliyatiga nisbati bir xil haroratga ega bo‘lgan barcha jismlar uchun bir xil bo‘ladi va xuddi o‘sha haroratda absolyut qora jismning integral yarim sferik nurlanish zichliligiga teng bo‘ladi

(17.10) va (17.11) tenglamalarni taqqoslashdan

$$\frac{c_1}{A_1} = \frac{c_2}{A_2} = \cdots\cdots = \frac{c_n}{A_n} = c_0 , \qquad (17.12)$$

$$c_1 = A_1 \cdot c_0 ; \quad c_2 = A_2 \cdot c_0 ; \cdots c_n = A_n \cdot c_0$$

bo‘lishi kelib chiqadi.

$\varepsilon = \frac{c}{c_0}$, ekanligini hisobga olish bilan $A = \varepsilon$ ni olamiz, ya’ni jismning yutish qobiliyati va qoralik darajasi son jihatidan o‘zaro teng bo‘ladi.

Kirxgof qonunidan kattaroq yutish qobiliyatiga ega bo‘lgan jismlar kattaroq nurlanish zichligiga ega bo‘lishi va aksincha bo‘lishi kelib chiqadi.

Masalalar

98.Issiqlik nurlanishining ikkita butunlay qora manbalari mavjud. Ulardan birining harorati T_1 = 2500 K. Agar uning maksimal nurlanish

qobiliyatiga mos keladigan to'lqin uzunligi birinchi manbaning maksimal nurlanish kuchiga mos keladigan to'lqin uzunligidan D_l = 0,50 mkm uzun bo'lsa, boshqa manbaning haroratini toping.

Javob: T_2 = 1750 K

99.Diametri d=1,2 sm bo'lgan mis to'p evakuatsiya qilingan idishga joylashtirildi, uning devor harorati mutlaq nolga yaqin saqlanadi. To'pning boshlang'ich harorati T_0 = 300 K. To'pning sirtini mutlaqo qora deb hisoblab, uning harorati qancha vaqt davomida η = 2,0 marta kamayishini toping.

Javob: t = 32 ^{0}C

100. Isitish pechidagi harorati 1200^{0}C. Pechning hajmi V=12m^2 va to‘la yuzasi F=28 m^2 ga teng.

101. Isitish pechidagi bosim 98,1 kPa, suv bug‘larining parsial bosimi R_{H_2O}=12 kPa ga teng bo‘lganda gazning qorayish darajasini va nurlanishini aniqlang.

Javob: E_g=0,215; E_g=57400 Vt/m^2.

102. Diametri d=0,5 mm va uzunligi ℓ=2,5m bo‘lgan elektr isitgich simning haroratini aniqlang. Simning qorayish darajasi E=0,9; atrofidagi armaturaning harorati 15^{0}C, isitgichning quvvati 0,4 kVt ga teng. Konveksiya hisobiga olinmasin.

Javob: t_1=910^{0}C.

Nazorat savollari

1. Nurlanish deb nimaga aytiladi?
2. *A, R, D* koeffitsiyentlari nimani bildiradi?
3. Mutlaq qora jism qanday bo‘ladi?
4. Mutlaq oq jism deb nimaga aytiladi?
5. SHaffof jism qanday bo‘ladi?
6. Plank qonunini tushuntirib bering.
7. Vin qonuni nimani ifodalaydi?
8. Stefan – Bolsman qonuni nimani ifodalaydi?
9. Kirxgof qonuni nimani aniqlaydi?

18. Issiqlik almashinish apparatlarining issiqlik hisobi

Neft va gazni qazib chiqarish, transportirovka qilish va qayta ishlashda texnologik zarurat tufayli yoki energiya sarflarini kamaytirish maqsadida bir muhitdan boshqa muhitga (suyuqlik yoki gazga) issiqlikni uzatish jarayonlaridan keng foydalaniladi. Ularda *issiqlik tashuvchilar* (muhitlar) oʻrtasida issiqlik uzatilishi sodir boʻladigan qurilmalar *issiqlik almashinish apparatlari* (IAA) deb ataladi.

18.1-rasm. Issiqlik almashinish apparatlari

18.1. Issiqlik almashinish apparatlarining tasnifi

Harakat tamoyiliga koʻra issiqlik almashinish apparatlari *rekuperativ, regenerativ* va *aralashtiruvchi* issiqlik almashinish apparatlariga boʻlinadi [2,5].

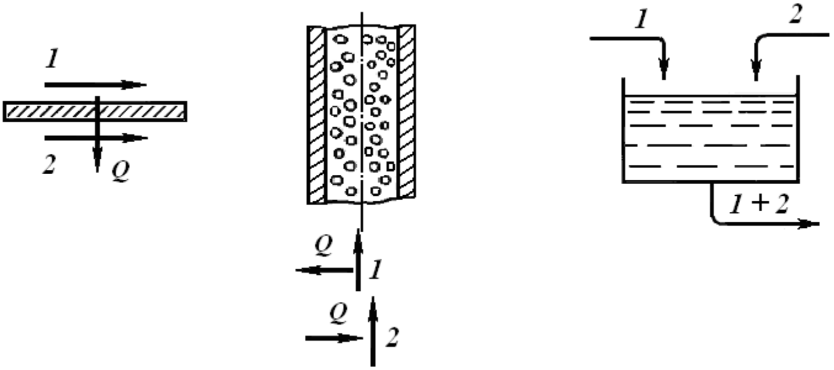
Rekuperativ issiqlik almashinish apparatlarida issiq va sovuq issiqlik tashuvchilar apparatga bir paytda beriladi, ular issiqlik almashinish yuzasini turli tomondan yuvadi, Q issiqlik oqimi esa issiq issiqlik tashuvchidan sovuq issiqlik tashuvchiga ularni ajratib turuvchi devor orqali uzatiladi (18.2,a-rasm).

Regenerativ issiqlik almashinish apparatlarida issiq va sovuq issiqlik tashuvchilar xuddi oʻsha bitta issiqlik almashinish yuzasini ketma-ket yuvadi (28b rasm). issiqlik almashinish yuzasini yuvishda issiq issiqlik tashuvchi unga oʻzining issiqligini beradi, soʻngra xuddi shu yuzani sovuq issiqlik tashuvchi yuvadi, u issiqlikni qabul qilib

olish bilan isiydi. Regenerativ issiqlik almashinish apparatlariga nasadkali tipdagi apparatlar misol bo'lib xizmat qila oladi.

Rekuperativ va regenerativ issiqlik almashinish apparatlarida issiqlik tashuvchilar o'rtasida *issiqlik uzatilish jarayonida* issiqlik almashinish yuzasi ishtirok etadi, shu sababli bu apparatlar *yuzali* apparatlar deb ataladi.

Aralashtiruvchi issiqlik almashinish apparatlarida issiqlik tashuvchilar o'rtasida issiqlik almashinishi ularni bevosita aralashtirish yo'li bilan amalga oshiriladi (28v rasm). Bu issiqlik almashinish apparatlari *kontaktli* apparatlar deb ataladi. Bunday issiqlik almashinish apparatlariga gradirnyalar misol bo'la oladi, ularda aylanuvchi suv atmosfera havosi bilan sovutiladi.



a) b) d)

18.2- rasm. Issiqlik almashinish apparatlarining chizmalari:
a – rekuperativ; *b* – regenerativ; d - aralashtiruvchi
1 – issiq issiqlik tashuvchi; 2 – sovuq issiqlik tashuvchi

Mo'ljallanishi bo'yicha issiqlik almashinish *konvektiv (isitgichlar va sovutgichlar (xolodilniklar)), bug'latgichlar, kondensatorlar* va *kristallizatorlarga* bo'linadi.

Konvektiv issiqlik almashinish apparatlarida issiqlik tashuvchilarning agregat aylanishlari sodir bo'lmaydi.

Bug'latgichlarda sovuq issiqlik tashuvchining yoki uning tarkibiy qismlarining bug'lanishi sodir bo'ladi.

Kondensatorlarda issiq issiqlik tashuvchi yoki uning tarkibiy qismi kondensatsiyalanadi.

Kristallizatorlardan issiq issiqlik tashuvchi oqimini issiq issiqlik tashuvchining ba'zi bir tarkibiy qismlarining kristallari hosil bo'lishini ta'minlaydigan haroratgacha sovutish uchun foydalaniladi.

18.2. Rekuperativ issiqlik almashinish apparatlarining issiqlik hisobining asoslari

Vazifaning qo'yilishiga bog'liq ravishda issiqlik almashinish apparatlarining issiqlik hisobi *konstruktiv* (birinchi turdagi hisoblashlar) va *qiyoslama* (ikkinchi turdagi hisoblashlar) bo'lishi mumkin.

Konstruktiv issiqlik hisobida issiqlik tashuvchining turi, issiqlik tashuvchilarning issiqlik almashinish apparatiga kirish va undan chiqishdagi harorati, shuningdek issiqlik tashuvchilarning sarfi aniqlanadi. Issiqlik almashinish apparatining issiqlik quvvati va issiqlik almashinish maydonining yuzasi aniqlanadi, so'ngra yangi apparat konstruksiyalanadi yoki standart apparat tanlanadi.

Qiyoslama issiqlik hisobida issiqlik almashinish apparatining tipi, tavsiflari va geometrik o'lchamlari, shuningdek issiqlik tashuvchilarning issiqlik almashinish apparatiga kirishdagi haroratlari aniqlanadi. Issiqlik almashinish apparatining quvvati va issiqlik tashuvchilarning issiqlik almashinish apparatidan chiqishdagi haroratlarini aniqlash zarur bo'ladi.

Rekuperativ issiqlik almashinish apparatlarining issiqlik hisobining asosiga quyidagilar qo'yilgan:

issiqlik balansining tenglamasi

$$Q = \eta \cdot Q_1 = Q_2, \tag{18.1}$$

va o'zgaruvchan haroratlarda umumlashtirilgan issiqlik uzatish tenglamasi

$$Q = kF \cdot \Theta_m, \tag{18.2}$$

bu yerda η – atrof-muhitga issiqlik yo'qolishlarini hisobga oluvchi koeffitsiyent, $\eta = 0{,}95 - 0{,}98$;

(18.1), (18.2) tenglamalar har qanday mo'ljallanishdagi rekuperativ issiqlik almashinish apparatlarining barcha tiplari uchun (isitgichlar, sovutgichlar, bug'latgichlar, kondensatorlar, kristallizatorlar) adolatli, biroq bunda issiqlik oqimlari (Q_1, Q_2) rekuperativ issiqlik almashinish

apparatlarining ko‘rsatilgan tiplarining har biri uchun turli hisoblash ifodalari bo‘yicha aniqlanadi (1 jadval) [2, 4, 7, 8].

Rekuperativ issiqlik almashinish apparatlarida issiq issiqlik tashuvchidan sovuq issiqlik tashuvchiga issiqlik uzatilish koeffitsiyenti quyidagi ifoda bo‘yicha aniqlanadi [2, 3]

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1}+(\delta/\lambda)_{\text{ифл }1}+\left(\delta_{\text{девор}}/\lambda_{\text{девор}}\right)+(\delta/\lambda)_{\text{ифл }2}\frac{1}{\alpha_2}}\ , \qquad (18.3)$$

bu yerda α_1, α_2 – issiq issiqlik tashuvchidan devorga va devordan sovuq issiqlik tashuvchiga issiqlik berish koeffitsiyentlari, $Вт/(м^2 \cdot К)$;

$(\delta/\lambda)_{\text{ифл }1}, (\delta/\lambda)_{\text{ифл }2}$ – issiq va sovuq issiqlik tashuvchilar tomonda issiqlik almashinish quvurlari yuzalarining ifloslanishining termik qarshiliklari, $(м^2 \cdot К)/Вт$;

$\left(\delta_{\text{девор}}/\lambda_{\text{девор}}\right)$ – issiqlik almashinish quvuri devorining termik qarshiligi, $(м^2 \cdot К)/Вт$.

Masalalar

103. Ichki yonuv dvigatelining teskari yo‘nalishli suvli moy sovitgich moy 65^0C dan 55^0C gacha sovitilyapti. Sovituvchi suvning kirishdagi harorati 16^0 C va chiqishdagi harorati 25^0C. Moyning sarfi 0,8 kg/sek. Issiqlik uzatish koeffitsiyenti 280 Vt/m^2 ^{0}C, moyning issiqlik sig‘imi 2,45 kJ/kg ^{0}C. Issiqlik almashuv yuzasini va sovuq suvning sarfini toping.

Javob: G = 0,52 kg/sek.

104. Quvur-quvurda qarama-qarshi yo‘nalishli issiqlik almashuv apparatida suv 15^0C dan 45^0C gacha isitiladi. Suvning sarfi G_2= 3200 kg/soat. Tashqi quvurning ichki diametri D=48 mm va bitta seksiya quvurining uzunligi l=1,9 m. Issiq suv diametri d_2/d_1=35/32 mm bo‘lgan po‘lat quvurda harakatlanib kirishdagi harorati t_1^1=95^0C ga teng. Issiq suvning sarfi G_1= 2130 kg/soat. Quvur-quvurda qarama-qarshi yo‘nalishli issiqlik almashuv apparatining isitish yuzasini va seksiyalar sonini aniqlang.

Javob: F = 1100 m^2 , n =7.

105. Qarama-qarshi yo‘nalishli issiqlik almashuv apparatidagi issiq suvning kirishdagi harorati 80^0C, chiqishdagi harorati 60^0C va sarfi G_1= 2 kg/s. Sovuq suvning kirishdagi harorati 10 ^{0}C va sarfi G_2= 0,75

kg/s. Issiqlik berish koeffitsiyentlari α_1=2000 Vt/m^{2}K, α_2= 4000 Vt/m^{2}K va devorning termik qarshiligi ma'lum bo'lsa, $\frac{\delta}{\lambda} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{100}$ issiqlik almashuv apparatining sirt yuzasini aniqlang.

Javob : F = 4,24 m^2.

Nazorat savollari

1. Issiqlik almashinish apparatlari deb nimaga aytiladi?
2. Issiqlik almashinish apparatlari qanday turlarga bo'linadi?
3. Issiqlik almashinish apparatlarining qaynday hisoblari mavjud?
4. Konstruktiv issiqlik hisobida qanday kattaliklar aniqlanadi?
5. Qiyoslama issiqlik hisobida qanday kattaliklar aniqlanadi?

ILOVALAR

1-ilova

SI xalqaro birliklar sistemasi

Kattalik	O‘lchov birligi	Birlikning yozilishi
Asosiy birliklar		
uzunlik	metr	m
massa	kilogramm	kg
vaqt	sekund	s
elektr tokining kuchi	Amper	A
Kelvinning termodinamik harorati	Kelvin	K
modda miqdori	mol	mol
yuza	metr kvadrat	m^2
hajm	metr kub	m^3
tezlik	sekundiga metr	m/s
tezlanish	sek.kv.ga metr	m/s^2
zichlik	metr kubga kilogramm	kg/m^3
kuch	Nyuton	N
bosim	Paskal	Pa
ish, energiya, issiqlik miqdori	Joul	J
quvvat, issiqlik oqimi	Vatt	Vt
solishtirma issiqlik sig‘imi	kilogramm Kelvinga Joul	J/kgK
entalpiya	kilogrammga Joul	J/kg
issiqlik oqimi zichligi	metr kvadratga Vatt	Vt/m^2
issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti	metr Kelvinga Vatt	Vt/(m·K)
issiqlik berish koeffitsiyenti	metr kvadrat Kelvinga Vatt	$Vt/(m^2 \cdot K)$
nurlanish koeffitsiyenti	metr Kelvin 4 darajasiga Vatt	$Vt/(m^2 \cdot K^4)$

2- ilova

Energiya	1 kkal=4,187 kJ
Kuch	1 kgs=9,81 N
Solishtirma og‘irlik	$1\ kg/sm^3=9,81\ N/m^3$
Zichlik	$1\ kg \cdot s^2/m^4=9,81\ kg/m^3$
Bosim	$1\ kg/sm^2=0,981 \cdot 10^5$ Pa
Dinamik qovushqoqlik koeffitsiyenti	$1\ kg \cdot s/m^2=9,81$ Pa·s
Issiqlik sig‘imi	$1kkal/(kg \cdot {}^0C)=4,187\ kJ/(kg \cdot {}^0C)$
Entalpiya	1kkal/kg=4,187kJ/kg
Issiqlik oqimi	1 kkal/soat=1,163 Vt
issiqlik oqimi zichligi	$1\ kkal/(m^2 \cdot soat)=1,163\ Vt/m^2$
issiqlik oqimi hajmiy zichligi	$1\ kkal/(m^3 \cdot soat)=1,163\ Vt/m^3$
issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti	$1\ kkal/(m \cdot soat \cdot {}^0S)=1,163\ Vt/m \cdot {}^0C$
issiqlik berish koeffitsiyenti	$1\ kkal/(m^2 \cdot soat \cdot {}^0S)=1,163\ Vt/m^2 \cdot {}^0C$
nurlanish koeffitsiyenti	$1\ kkal/(m^2 \cdot soat \cdot K^4) =1,163\ Vt/(m^2 \cdot K^4)$

3- ilova

Muhim gazlarning va molekulyar massa, zichlik va normal sharoitda kilomol hajmlari va gaz doimiylari

Modda	Kimyoviy yozilishi	molekulyar massa, μ	Zichlik ρ, kg/m^3	kilomol hajmlari μv, m^3/kg	Gaz doimiysi J/(kg·K)
Havo	-	28,96	1,239	22,40	287,0
Kislorod	O_2	32,00	1,429	22,39	259,8
Azot	N_2	28,026	1,251	22,40	296,8
Atmosfera azoti	N_2	28,16	(1,257)	(22,40)	(295,3)
Geliy	He	4,003	0,179	22,42	2078,0
Argon	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Vodorod	H_2	2,016	0,090	22,43	4124,0
Uglerod oksidi	SO	28,01	1,250	22,40	296,8
Uglerod-(IV)-oksid	SO_2	44,01	1,977	22,26	188,9
Oltingugurt-(IV)-oksid	SO_2	64,06	2,926	21,89	129,8
Metan	SN_4	16,032	0,717	22,39	518,8
Etilen	S_2N_4	28,052	1,251	22,41	296,6
Koks gazi	-	11,50	0,515	22,33	721,0
Ammiak	NH_3	17,032	0,771	22,08	488,3
Suv bug‘i	N_2O	18,016	(0,804)	(22,40)	(461)

4- ilova

Kislorodning issiqlik sig‘imi

Haro-rat	Molyar issiqlik sig‘imi, J/(kmol·K)				Massaviy issiqlik sig‘imi, J/(kg·K)		Hajmiy issiqlik sig‘imi, J/(m^3·K)	
t, ^0C	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	μc_{pm}	μc_{vm}	$\mu c'_{pm}$	$\mu c'_{vm}$
0	29,274	20,959	29,274	20,959	0,9148	0,6548	1,3059	0,9349
100	29,877	21,562	29,538	21,223	0,9232	0,6632	1,3176	0,9466
200	30,815	22,500	29,931	21,616	0,9353	0,6753	1,3352	0,9642
300	31,832	23,517	30,400	22,085	0,9500	0,6900	1,3561	0,9852
400	32,758	24,443	30,878	22,563	0,9651	0,7051	1,3775	1,0065
500	33,549	25,234	31,334	23,019	0,9793	0,7193	1,3980	1,0270
600	34,202	25,887	31,761	23,446	0,9927	0,7327	1,4168	1,0459
700	34,746	26,431	32,150	23,835	0,0048	0,7448	1,4344	1,0634
800	35,203	26,888	32,502	24,187	1,0157	0,7557	1,4499	1,0789
900	35,584	27,269	32,825	24,510	0,0258	0,7658	1,4645	1,0936
1000	35,914	27,599	33,118	24,803	1,0350	0,7750	1,4775	1,1066
1100	36,216	27,901	33,386	25,071	1,0434	0,7834	1,4892	1,1183
1200	36,488	28,173	33,633	25,318	1,0509	0,7913	1,5005	1,1296
1300	36,752	28,437	33,863	25,548	1,0580	0,7984	1,5106	1,1396
1400	36,999	28,684	34,076	25,761	1,0647	0,8051	1,5202	1,1493
1500	37,242	28,927	34,282	25,967	1,0714	0,8114	1,5294	1,1585
1600	37,480	29,165	34,474	26,159	1,0773	0,8173	1,5378	1,1669
1700	37,715	29,400	34,658	26,343	1,0831	0,8231	1,5462	1,1752

5- ilova

Azotning issiqlik sig'imi

Haro-rat	Molyar issiqlik sig'imi, J/(kmol·K)				Massaviy issiqlik sig'imi, J/(kg·K)		Hajmiy issiqlik sig'imi, J/(m³·K)	
t, ^{0}C	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	μc_{pm}	μc_{vm}	$\mu c'_{pm}$	$\mu c'_{vm}$
0	29,115	20,800	29,115	20,800	1,0392	0,7423	1,2987	0,9278
100	29,199	20,884	29,144	20,829	1,0404	0,7427	1,3004	0,9295
200	29,471	21,156	29,228	20,913	1,0434	0,7465	1,3038	0,9328
300	29,952	21,637	29,383	21,068	1,0488	0,7519	1,3109	0,9399
400	30,576	22,261	29,601	21,286	1,0567	0,7599	1,3205	0,9496
500	31,250	22,935	29,864	21,549	1,0660	0,7691	1,3322	0,9613
600	31,920	23,605	30,149	21,834	1,0760	0,7792	1,3452	0,9743
700	32,540	24,225	30,451	22,136	1,0869	0,7900	1,3586	0,9877
800	33,101	24,786	30,748	22,433	1,0974	0,8005	1,3716	1,0006
900	33,599	25,284	31,037	22,722	1,1078	0,8110	1,3845	1,0136
1000	34,039	25,724	31,313	22,998	1,1179	0,8210	1,3971	1,0178
1100	34,424	26,109	31,577	23,262	1,1271	0,8302	1,4089	1,0379
1200	34,773	26,448	31,828	23,513	1,1359	0,8395	1,4202	1,0492
1300	35,070	26,745	32,067	23,752	1,1447	0,8478	1,4306	1,0597
1400	35,330	27,005	32,293	23,978	1,1526	0,8558	1,4407	1,0697
1500	35,556	27,231	32,502	24,187	1,1602	0,8633	1,4499	1,0789
1600	35,757	27,432	32,699	24,384	1,1673	0,8704	1,4587	1,0877
1700	35,937	27,612	32,883	24,568	1,1736	0,8771	1,4671	1,0961

6- ilova

Uglerod-(II)-oksidining issiqlik sig'imi

Haro-rat	Molyar issiqlik sig'imi, J/(kmol·K)				Massaviy issiqlik sig'imi, J/(kg·K)		Hajmiy issiqlik sig'imi, J/(m³·K)	
t, ^{0}C	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	μc_{pm}	μc_{vm}	$\mu c'_{pm}$	$\mu c'_{vm}$
0	35,860	27,545	35,860	27,545	0,8148	0,6259	1,5998	1,2288
100	40,206	31,891	38,112	29,797	0,8658	0,6770	1,7003	1,3293
200	43,689	35,374	40,059	31,744	0,9102	0,7214	1,7373	1,4164
300	46,515	38,200	41,755	33,440	0,9487	0,7599	1,8627	1,4918
400	48,860	40,515	43,250	34,935	0,9826	0,7938	1,9297	1,5587
500	50,825	42,500	44,573	36,258	1,0128	0,8240	1,9887	1,6178
600	52,452	44,137	45,753	37,438	1,03	0,8508	2,0411	1,6701
700	53,826	45,511	46,813	38,498	1,0639	0,8746	2,0884	1,7174
800	54,977	46,662	47,763	39,448	1,0852	0,8964	2,1311	1,7601
900	55,952	47,637	48,617	40,302	1,1045	0,9157	2,1692	1,7982
1000	56,773	48,458	49,392	41,077	1,1225	0,9332	2,2035	1,8326
1100	57,472	49,157	50,099	41,784	1,1384	0,9496	2,2349	1,8640
1200	58,071	49,756	50,740	42,425	1,1530	0,9638	2,2638	1,8929
1300	58,586	50,271	51,322	43,007	1,1660	0,9772	2,2898	1,9188
1400	59,030	50,715	51,858	43,543	1,1782	0,9893	2,3136	1,9427
1500	59,411	51,096	52,348	44,033	1,1895	1,0006	2,3354	1,9644

1600	59,737	51,422	52,800	44,485	1,1995	1,0107	2,3555	1,9845
1700	60,022	51,707	53,218	44,903	1,2091	1,0203	2,3743	2,0034

7- ilova

Suv bug‘ining issiqlik sig‘imi

Haro-rat	Molyar issiqlik sig‘imi, J/(kmol·K)				Massaviy issiqlik sig‘imi, J/(kg·K)		Hajmiy issiqlik sig‘imi, J/(m^3·K)	
t, ^{0}C	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	μc_{pm}	μc_{vm}	$\mu c'_{pm}$	$\mu c'_{vm}$
0	33,499	25,184	33,499	25,184	1,8594	1,3980	1,4943	1,1237
100	34,055	25,740	33,741	25,426	1,8728	1,4114	1,5052	1,1342
200	34,964	26,649	34,118	25,803	1,8937	1,4323	1,5223	1,1514
300	36,036	27,721	34,575	26,260	1,9192	1,4574	1,5424	1,1715
400	37,191	28,876	35,090	26,775	1,9477	1,4863	1,5654	1,1945
500	38,406	30,091	35,630	27,315	1,9778	1,5160	1,5897	1,2188
600	39,662	31,347	36,195	27,880	2,0092	1,5474	1,6148	1,2439
700	40,951	32,636	36,789	28,474	2,0419	1,5805	1,6412	1,2703
800	42,249	33,934	37,392	29,077	2,0754	1,6140	1,6680	1,2971
900	43,513	35,198	38,008	29,693	2,1097	1,6483	1,6957	1,3247
1000	44,723	36,408	38,619	30,304	2,1436	1,6823	1,7229	1,3519
1100	45,858	37,543	39,226	30,911	2,1771	1,7158	1,7501	1,3791
1200	46,913	38,598	39,825	31,510	2,2106	1,7488	1,7769	1,4059
1300	47,897	39,582	40,407	32,092	2,2429	1,7815	1,8028	1,4319
1400	48,801	40,486	40,976	32,661	2,2743	1,8129	1,8280	1,4570
1500	49,639	41,324	41,525	33,210	2,3048	1,8434	1,8527	1,4817
1600	50,409	42,094	42,056	33,741	2,3346	1,8728	1,8761	1,5052
1700	51,133	42,818	42,576	34,261	2,3630	1,9016	1,8996	1,5286

8- ilova

Havoning issiqlik sig‘imi

Haro-rat	Molyar issiqlik sig‘imi, J/(kmol·K)				Massaviy issiqlik sig‘imi, J/(kg·K)		Hajmiy issiqlik sig‘imi, J/(m^3·K)	
t, ^{0}C	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	μc_{pm}	μc_{vm}	$\mu c'_{pm}$	$\mu c'_{vm}$
0	29,073	20,758	29,073	20,758	1,0036	0,7164	1,2971	0,9261
100	29,266	20,951	29,152	20,758	1,0061	0,7193	1,3004	0,9295
200	29,676	21,361	29,299	20,984	1,0115	0,7243	1,3071	0,9362
300	30,266	21,951	29,521	21,206	1,0191	0,7319	1,3172	0,9462
400	30,949	22,634	29,789	21,474	1,0283	0,7415	1,3289	0,9579
500	31,640	23,325	30,095	21,780	1,0387	0,7519	1,3427	0,9718
600	32,301	23,986	30,405	22,090	1,0496	0,7624	1,3565	0,9856
700	32,900	24,585	30,723	22,408	1,0605	0,7733	1,3708	0,9998
800	33,432	25,117	31,028	22,713	1,0710	0,7842	1,3842	1,0312
900	33,905	25,590	31,321	23,006	1,0815	0,7942	1,3976	1,0262
1000	34,315	26,00	31,598	23,283	1,0907	0,8039	1,4097	1,0387
1100	34,679	26,394	31,862	23,547	1,0999	0,8127	1,4214	1,0505
1200	35,002	26,687	32,109	23,794	1,1082	0,8215	1,4327	1,0618

1300	35,291	26,976	32,343	24,028	1,1166	0,8294	1,4432	1,0722
1400	35,546	27,231	32,565	24,250	1,1242	0,8369	1,4528	1,0819
1500	35,772	27,457	32,774	24,259	1,1313	0,8441	1,4620	1,0911
1600	35,977	27,662	32,967	24,652	1,1380	0,8508	1,4708	1,0999
1700	36,170	27,855	33,151	24,836	1,1443	0,8570	1,4788	1,1078

9- ilova

Quruq bug‘ning fizik xossalari (V=760 mm sim.ust≈$1,01\cdot10^5$ Pa)

t, ^{0}C	ρ, kg/m^3	c, kJ/(kg·^{0}C)	λ, Vt/m·^{0}C	$a\cdot10^6$, m^2/s	$\mu\cdot10^6$, Pa·s	$\nu\cdot10^6$, m^2/s	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,63	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	26,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,682

10- ilova

To‘yinish chizig‘idagi suvning fizik xossalari

t,^{0}C	$r\cdot10^{-5}$, Pa	ρ, kg/m^3	h, kJ/kg	c_p, kJ/(kg·^{0}C)	$\lambda\cdot10^2$, Vt/m·^{0}C	$a\cdot10^8$, m^2/s	$\mu\cdot10^6$, Pa·s	$\nu\cdot10^6$, m^2/s	$\beta\cdot10^4$, K^{-1}	$\sigma\cdot10^4$, N/m	Pr
0	1,013	999,9	0,00	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	1,013	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	13,06	1,306	+0,70	741,6	9,52
20	1,013	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,02
30	1,013	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	1,013	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	1,013	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	4,49	676,9	3,54
60	1,013	983,2	251,1	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	1,013	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	643,5	2,55
80	1,013	971,8	335,0	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	1,013	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,95	607,2	1,95

100	1,013	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,8	1,36
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	67,9	17,3	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	67,4	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,00
190	12,55	876,0	807,8	4,459	67,0	17,1	144,2	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,55	863,0	852,5	4,505	66,3	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,93
210	19,08	852,8	897,7	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	23,20	840,3	943,7	4,614	64,5	16,6	124,6	0,148	14,8	331,6	0,89
230	27,98	827,3	990,2	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	15,9	310,0	0,88

11- ilova

To‘yinish chizig‘idagi suv bug‘ining fizik xossalari

t, ^{0}C	$r\cdot10^{-5}$, Pa	ρ″, kg/m^3	h″, kJ/kg	r, kJ/kg	c_p, kJ/(kg^{0}C)	$\lambda\cdot10^2$, Vt/m·^{0}C	$a\cdot10^8$, m^2/s	$\mu\cdot10^6$, Pa·s	$\nu\cdot10^6$, m^2/s	Pr
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,372	18,58	11,97	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,8	2,177	2,489	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2230,0	2,206	2,593	10,50	12,85	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2202,8	2,257	2,686	7,972	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2174,3	2,315	2,791	6,130	13,54	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2145,0	2,395	2,884	4,728	13,93	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2114,4	2,479	3,012	3,722	14,32	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,0	2082,6	2,583	3,128	2,939	14,72	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2049,5	2,709	3,268	2,339	15,11	2,93	1,25
190	12,55	6,394	2786,4	2015,2	2,856	3,419	1,872	15,60	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1978,8	3,023	3,547	1,492	15,99	2,03	1,36
210	19,08	9,588	2798,2	1940,7	3,199	3,722	1,214	16,38	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1900,5	3,408	3,896	0,983	16,87	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1857,8	3,634	4,094	0,806	17,36	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803,2	1813,0	3,881	4,291	0,658	17,76	1,06	1,61

ADABIYOTLAR

1. Кудинов В.А., Е.М.Карташов. Техническая термодинамика. -М.: Высшая школа, 2005

2. Андрианова Т.Н. и др. Сборник задач по технической термодинамике, М.: МЭИ, 2000

3. Под ред. Захаровой А.А. Техническая термодинамика и теплотехника. -М.: Академия, 2006

4. Агеев Е.П. Неравновесная термодинамика в вопросах и ответах. – М. 2019

5. Белов Г.В. Термодинамика в 2 ч. Часть 1: Учебник и практикум. – Люберсы: Юрайт, 2016

6. Белов Г.В. Термодинамика в 2 ч. Часть 2: Учебник и практикум. – Люберсы: Юрайт, 2016

7. Зохидов Р.А., Алимова М.М., Мавжудова Ш.С. Иссиқлик техникаси.Тошкент: Ўзбекистон файласуфлари миллий жамияти, 2010.-200 б.

8. Зоҳидов Р.А., Авезов Р.Р., Вардияшвили А.Б., Алимова М.М. «Иссиқлик техникасининг назарий асослари» ўқ.қўл., 1 қисм, ТГТУ. 2005

9. Зоҳидов Р.А., Алимова М.М., Мавжудова Ш.С. Техник термодинамика ва иссиқлик узатилиши фанидан масалалар тўплами, ТДТУ. Тошкент, 2006

MUNDARIJA

Kirish 3
TEXNIK TERMODINAMIKA
1. Termodinamikaning asosiy tushuncha va ta’riflari 4
1.1. Termodinamik tizim 4
1.2. Holat parametrlari 5
1.3. Termodinamik jarayonlar 9
1.4. Termodinamik ish 11
1.5. Jismning ichki energiyasi 13
1.6. Issiqlik 13
1.7. Jismning issiqlik sig‘imi 14
2. Moddaning fizikaviy holati..18
3. Ideal va real gazlarning qonunlari 20
4. Termodinamikaning birinchi asosi...26
4.1. Termodinamikaning birinchi asosi energiyaning saqlanish qonunining matematik ifodalanishi sifatida 26
4.2. Oddiy jismlar uchun termodinamikaning birinchi asosi 28
4.3. Termodinamikaning birinchi asosining analitik ifodasi 31
4.4. Ideal gazlar uchun termodinamikaning birinchi asosi 33
5. Termodinamik tizimlarning holatining o‘zgarish jarayonlari..........37
5.1. Termodinamik jarayonlarning tasnifi 37
5.2. Eng oddiy termodinamik jarayonlar...37
5.3. Politrop jarayonlar 44
5.4. Oddiy jismlarning politrop jarayonlarida ish 49
5.5. Oddiy jismlardagi termodinamik jarayonlarda issiqlik almashinishi 50
5.6. Ideal gazning holatining o‘zgarish jarayonlari 53
6. Aylanma jarayonlar (sikllar) 56
6.1. Issiklik mashinalari 56
6.2. Karno sikli 60
7. Termodinamikaning ikkinchi asosi 65
8. Suyuqliklar, bug‘lar va gazlarning aralashmalari 74
8.1. Umumiy tushunchalar 74
8.2. Ideal gazlarning aralashmalari 75
8.3. Real gazlarning aralashmalari 70
9. Bug‘lar va bug‘ hosil bo‘lishi 80
9.1. Bug‘ hosil bo‘lish jarayoni. Asosiy ta’riflar 80
9.2. To‘yingan va o‘ta qizigan bug‘ning xususiyatlari 82
10. Kompressorlarda siqish 89

10.1. Ko‘p bosqichli kompressorning termodinamik jarayoni 94
11. Yoqilg’i va uning xossalari 99
11.1. Yoqilg’i tarkibi..99
11.2. Yoqilg’ining kulligi va namligi..105
11.3. Yoqilg’i yonishi issiqligi..107
12. Bug‘-kuch va sovutish qurilmalarining sikllari 115
12.1. Bug‘-kuch qurilmasi. Renkin sikli..115
12.2 Bug‘-kuch qurilmalarining tejamkorligini oshirish yo‘llari 117
12.3. Sovutish qurilmasining sikllari 122
12.4. Bug‘li kompression sovutish qurilmasi..123
12.5. Havo bilan sovutish qurilmasi...124
12.6. Aborbsion sovutish qurilmasi 125
13. Ichki yonuv dvigatellarining sikllari 129
13.1. Porshenli ichki yonuv dvigatellarining sikllari 129
14. Gaz-turbinali qurilmalarning (GTQ) sikllari 140
14.1. Bosim o‘zgarmas jarayonidagi issiqlik keltiruvchi gaz turbina qurilmasining sikli...140
14.2. Hajm o‘zgarmas jarayonidagi issiqlik keltiruvchi gaz turbina qurilmasining sikli...143
15. Issiqlik uzatilishi asoslari...149
15. 1 Issiqlik o‘tkazuvchanlik 151
15.1.1. Asosiy tushunchalar 151
15.2. Barqaror harorat maydonida issiqlik o‘tkazuvchanlik.....................153
15.3. Barqaror issiqlik o‘tkazuvchanlik 154
15.4. Issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti...155
15.5. Yassi devorning issiqlik o‘tkazuvchanligi 156
15.6. Silindrik devorning issiqlik o‘tkazuvchanligi 158
16. Konvektiv issiqlik almashinishining asosiy qoidalari.....................162
16.1. O‘xshashlik nazariyasi va o‘lchamlilikni tahlil qilish uslubining asoslari...163
16.2. O‘xshashlik mezonlari va mezonli tenglamalar................................165
17. Nurlanish usulida issiqlik uzatilishi...168
17.1. Nurlanish qonunlari..170
18. Issiqlik almashinish apparatlarining issiqlik hisobi 174
18.1. Issiqlik almashinish apparatlarining tasnifi 174
18.2. Rekuperativ issiqlik almashinish apparatlarining issiqlik hisobining asoslari...176
Ilovalar..179
Adabiyotlar...186

M.A. KOROLI, F.SH. UMARJONOVA, F.A. XOSHIMOVA

TERMODINAMIKA
ISSIQLIK TEXNIKASI

Muharrir: X. Tahirov
Texnik muharrir: S. Meliquziyeva
Musahhih: M. Yunusova
Sahifalovchi: A. Muhammad

Nashr. lits № 0565. 29.01.2022.
Bosishga ruxsat etildi 29.08.2022.
Bichimi 60x84 1/16. Ofset qog‘ozi. ‘‘Times New Roman’’
garniturasi. Hisob-nashr tabog‘i. 17,5.
Adadi 200 dona. Buyurtma № 1.

«BOOK TRADE KO» MCHJ bosmaxonasida chop etildi.
Manzil: Toshkent sh., Yashnobod t, 58A harbiy shaharcha, 47/21.